

Università degli studi di Napoli Federico II



Facoltà di Ingegneria

Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale

**Dottorato di Ricerca in Ingegneria Aerospaziale,
Navale e Della Qualità**

XXVII Ciclo

Tesi di Dottorato

**Progettazione e Sviluppo di un sistema di GSE per il controllo
di sensori per applicazioni spaziali.**

**Test e analisi di un rivelatore compatto di polveri
per l'ambiente Marziano**

Tutori:

Dott.sa Esposito Francesca – INAF OAC
Ing. Giuseppe Capuano – Techno System s.r.l.

Candidato :

Fabio Cozzolino

Coordinatore: Prof. Luigi De Luca

2015

Indice

Introduzione

1 Introduzione al pianeta Rosso	7
1.1. Il pianeta Rosso	7
1.2. Atmosfera Marziana	10
1.3. I Venti Marziani	13
1.4. Polvere Atmosferica	14
1.4.1. Tempesta di Sabbia, Dust Devils e Campi Elettrici	19
2 Contatori ottici di particelle-OPC (Optical Particle Counter)	22
2.1. Tecniche di Misurazione delle polveri Marziane	23
2.2. Principi di funzionamento degli OPC	24
2.3. Luce diffusa da una particella sferica	26
2.4. Teoria di Mie	31
2.5. Applicazione degli OPC	33
2.5.1. Effetti delle particelle sulla salute umana	34
2.5.2 Effetti delle particelle sull'ambiente e sulla meteorologia	35
3 MicroMed (Micro Medusa): un OPC per l'ambiente Marziano	36
3.1. Obiettivi scientifici di Medusa	37
3.2. Il rivelatore Medusa	38
3.2.1. Sistema ottico (OS)	38
3.3. MicroMed	40
3.3.1. Testa di campionamento, Inlet ed Outlet	43
3.3.2. Sistema Ottico	46
3.3.3. Caratteristiche della sorgente laser	48
3.3.4. Fotorivelatore	49
3.3.5. Pompa	50
3.3.6. Elettronica di Prossimità (P.E.)	52
3.3.7. Mock-up MicroMed e Test eseguiti	52
4 Test Fluidodinamici	54
4.1. Apparato sperimentale per ricreare le condizioni atmosferiche di Marte	54
4.1.1. Misure della distribuzione delle particelle nella camera 1	56
4.2. Simulazioni eseguite sul disegno fluidodinamico	58
4.3. Test Fluidodinamici	61
4.3.1. Misura per la verifica dell'assenza di moti turbolenti e vortici all'interno di MicroMed	62

4.3.2. Misura della dispersione del flusso di particelle rispetto al centro del volume di Campionamento.....	64
4.4. Analisi delle cornici.....	66
4.5. Analisi delle cornici per un flusso di particelle di 0.5 μm di diametro.....	66
4.6. Analisi delle cornici per particelle di 1.30 μm di diametro.....	72
4.7. Analisi delle cornici per particelle di 2.867 μm di diametro.....	78
4.8. Analisi delle cornici per particelle di 4.32 μm di diametro.....	80
4.9. Analisi delle cornici per particelle di 6.36, 8.43, 11 e 14.98 μm di diametro.....	82
4.10 Conclusioni dell'analisi delle cornici.....	83
5 Sistema ottico e misure dei parametri del volume di campionamento.....	84
5.1. Sistema Ottico.....	84
5.2. Caratterizzazione del Volume di Campionamento.....	85
5.3. Misura allineamento Laser-Sistema di lenti 1.....	86
5.4. Misura della Forma e Dimensione del volume di campionamento.....	87
5.5. Misura della potenza ottica del volume di campionamento e valutazione delle prestazioni del sistema ottico.....	91
6 Elettronica di prossimità ed EGSE.....	92
6.1. Test su Scheda PE.....	94
6.2. EGSE.....	96
7 Calibrazione di MicroMED.....	98
7.1. Analisi dei segnali acquisiti da MicroMED.....	100

Conclusioni

Bibliografia

Introduzione

Il lavoro di dottorato si inserisce nell'ambito del progetto MicroMED che prevede lo sviluppo di uno strumento per la misura diretta ed *in situ* della distribuzione dimensionale e della concentrazione della polvere in sospensione nell'atmosfera di Marte in prossimità della superficie.

Le particelle di polvere sono costantemente presenti nell'atmosfera marziana e la loro concentrazione varia con i cicli stagionali. Il monitoraggio della polvere atmosferica è molto importante per lo studio del clima di un pianeta. La polvere, infatti, assorbe e diffonde la radiazione solare e termica, impattando fortemente sulla struttura termica, sul bilancio e sulla dinamica (in termini di circolazione) dell'atmosfera. Le caratteristiche principali della polvere che influenzano il riscaldamento dell'atmosfera sono la distribuzione dimensionale, l'abbondanza, l'albedo, la funzione di fase di diffusione singola e la parte immaginaria dell'indice di rifrazione. Delle grandezze elencate, le prime due possono essere misurate da MicroMED.

Inoltre, il vento e la polvere sono i protagonisti principali dell'evoluzione della morfologia della superficie marziana attraverso l'erosione, il trasporto e la ridistribuzione della polvere sul pianeta. Questi processi dipendono fortemente dall'intensità del vento e dalle proprietà della polvere (principalmente la dimensione dei grani). La polvere trasportata dal vento modifica anche la chimica dei materiali della superficie esercitando su questi un'azione meccanica (*weathering*).

E' chiaro quindi che la conoscenza delle proprietà della polvere atmosferica e dei relativi meccanismi di sollevamento, trasporto e deposizione costituisce un elemento chiave nella comprensione del clima del pianeta e dell'evoluzione della sua superficie.

Le informazioni sulla proprietà e sulla dinamica della polvere sono importanti anche per la programmazione di missioni future su Marte. La conoscenza del tasso di deposizione della polvere sui pannelli solari e la forma e la dimensione delle particelle costituiscono elementi cruciali per il disegno di missioni che devono operare con pannelli solari per lunghi periodi e che dispongono di parti meccaniche in movimento le cui prestazioni possano degradarsi nel tempo per effetto della polvere. L'informazione è essenziale anche per la programmazione delle missioni future che prevedono la presenza dell'uomo su Marte, in relazione alla caratterizzazione delle condizioni di rischio dovute all'ambiente.

Attualmente, i dati disponibili in letteratura sulla struttura e dinamica delle polveri sono abbastanza scarsi. La distribuzione dimensionale è nota solo grossolanamente e il meccanismo di sollevamento e immissione della polvere in atmosfera, e la variabilità geografica sono ancora materia di controversia.

MicroMED è uno strumento innovativo, perché permette di effettuare misure in situ sulla superficie di Marte e fornisce una misura diretta della dimensione dei grani di polvere. Attualmente la distribuzione dimensionale della polvere viene misurata in maniera indiretta principalmente attraverso osservazioni in remoto (osservazioni al limbo, spettroscopia dell'atmosfera, ecc.). Per estrarre informazioni sulla distribuzione dimensionale da queste misure, sono necessarie diverse assunzioni sulla forma stessa della distribuzione (scelta a-priori) e sulle proprietà dei grani. Inoltre le misure sono relative all'intera colonna atmosferica con scarse informazioni sullo strato prossimo alla superficie, dove inizia il processo di immissione della polvere in sospensione. MicroMED potrà coprire questo gap misurando *direttamente e in situ*, per la prima volta nell'esplorazione marziana, il flusso e la distribuzione dimensionale della polvere in seguito al sollevamento dalla superficie.

Lo strumento raccoglie le particelle sospese in atmosfera attraverso un sistema di aspirazione e le concentra in una piccola area interna al dispositivo, che viene illuminata da un fascio laser focalizzato da un sistema ottico. Attraversando tale area, i grani di polvere diffondono la radiazione ricevuta, che viene raccolta da uno specchio che la focalizza su un rivelatore. La risposta del rivelatore viene processata poi dall'elettronica di prossimità.

Il lavoro di dottorato ha previsto la partecipazione alla progettazione e realizzazione del rivelatore di polvere MicroMED, la messa a punto di un set-up sperimentale (hardware e software) per la verifica e la calibrazione del prototipo realizzato e l'attività di test.

Le attività sono state svolte in parte presso l'INAF-Osservatorio Astronomico di Capodimonte (OAC), Napoli e in parte presso l'azienda Techno System Developments S.r.l (TSD), Pozzuoli (Napoli). Le attività svolte presso l'OAC consistono in:

- realizzazione di un *Mechanical Ground Support Equipment* (MGSE),
- verifica del sistema di aspirazione di MicroMED,
- verifica e caratterizzazione del sistema ottico di MicroMED,
- test e calibrazione dello strumento MicroMED.

Le attività svolte presso TSD sono:

- realizzazione di un *Electrical Ground Support Equipment* (EGSE),
- sviluppo di un software di acquisizione e analisi dati,
- test sulla scheda dell'elettronica di prossimità (PE).

La tesi si articola nel seguente modo:

Il Capitolo 1: (Introduzione al pianeta Marte) breve descrizione delle caratteristiche del pianeta Marte ricavate da missioni spaziali, osservazioni dalla Terra e modelli. Il capitolo si sofferma in particolare sulla descrizione dell'atmosfera marziana e della dinamica della polvere in sospensione. Viene descritto lo stato dell'arte sullo studio dei processi di sollevamento della polvere ed i problemi aperti. Il capitolo fornisce un quadro dell'ambiente in cui lo strumento MicroMED dovrebbe operare.

Il Capitolo 2: [Contatori ottici di particelle - OPC (optical particle counter)] riassume le tecniche utilizzate per misurare le caratteristiche fisiche, ottiche e chimiche delle polveri su Marte. In special modo focalizza l'attenzione su una metodologia di misura molto sviluppata in ambito terrestre ma mai utilizzata per Marte. La tecnica a cui si fa riferimento è il rivelamento ottico sfruttato dagli OPC (Optical Particle Counter), strumenti in grado di fornire una misura diretta della distribuzione dimensionale della polvere atmosferica a partire dalla determinazione della dimensione dei singoli grani che la costituiscono.

Il Capitolo 3: (MicroMED-Micro MEDUSA- OPC Marziano) è una descrizione dettagliata dello strumento MicroMED in tutte le sue parti. MicroMED è un dispositivo capace di aspirare e focalizzare un flusso di aria e particelle di polvere in una regione illuminata da un sistema ottico chiamata volume di campionamento. Durante il transito nel volume di campionamento, le particelle diffondono la radiazione ricevuta. La luce diffusa è focalizzata su un fotodiodo che fornisce un segnale dipendente dalla dimensione della particella. Nel capitolo è descritto brevemente anche lo strumento MEDUSA, dalla cui miniaturizzazione è nato MicroMED.

Il Capitolo 4: (Test Fluidodinamici) descrive le attività svolte per studiare la dinamica del flusso aspirato dallo strumento MicroMED. In particolare sono stati eseguiti dei test per misurare il regime del flusso (turbolento o laminare) e la dinamica delle particelle aspirate.

Il Capitolo 5: (Sistema Ottico e misure dei parametri del volume di campionamento) descrive il sistema ottico di MicroMED e le misure effettuate su questo per determinare le caratteristiche

principali del volume di campionamento (forma, dimensione e potenza ottica). Il sistema ottico è costituito da una sorgente luminosa, una fibra ottica, una trappola di luce, uno specchio ed una serie di lenti. Genera la regione illuminata attraversata dalla particelle.

Il Capitolo 6: (Scheda PE ed EGSE) descrive lo sviluppo del sistema di controllo ed acquisizione dei dati dello strumento MicroMED (EGSE) e i test svolti per la verifica dell'elettronica di prossimità. L'elettronica di prossimità processa il segnale in corrente in uscita dal fotodiodo, ossia dal rivelatore che raccoglie la radiazione diffusa dalle particelle in transito nel volume di campionamento dello strumento.

Il sistema di acquisizione è costituito da un PC equipaggiato con una scheda PCI e da programmi sviluppati in ambiente LabVIEW per gestire l'acquisizione e l'elaborazione dei dati.

Sono stati effettuati dei test per verificare le prestazioni del sistema di amplificazione della scheda della PE (guadagno, dinamica e banda di frequenza e canale di offset) e l'efficienza del sistema di acquisizione.

Il Capitolo 7: descrive le procedure e i risultati dei test funzionali e di calibrazione eseguiti su MicroMED. Il requisito scientifico primario di MicroMED è la misura della dimensione delle particelle nell'intervallo compreso tra 0.2 -10 μm di raggio. Attraverso la calibrazione dello strumento si determina la relazione tra l'output di MicroMED, espresso in Volt (dato ingegneristico), e la grandezza fisica oggetto della misura, ossia la dimensione della particella rilevata dallo strumento.

Per i test sono state utilizzate particelle calibrate con i seguenti diametri: 1.046, 2.043, 4.051, 6.178, 8.496 μm . I dati forniti da MicroMED sono stati confrontati con i dati ottenuti da una simulazione basata sulla teoria di Mie della diffusione della luce, eseguita considerando i parametri del volume di campionamento misurati sperimentalmente.

1.Introduzione al pianeta Marte

1.1 Il pianeta Rosso

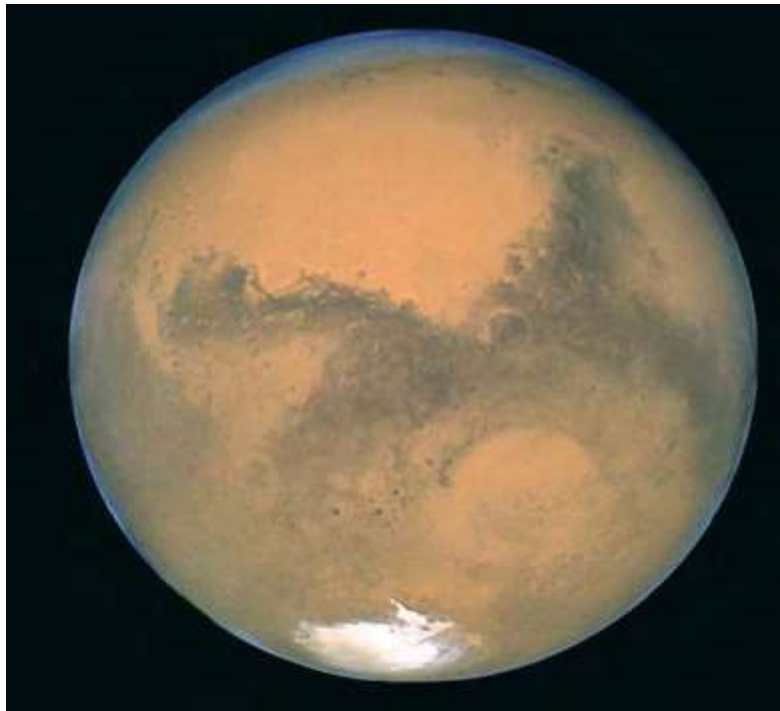


Figura 1.1: Marte (Hubble Space Telescope, 26/08/2003, NASA).

Marte (Figura 1.1) è il quarto pianeta del Sistema Solare. E' spesso identificato come il pianeta rosso a causa della presenza di grandi quantità di ossido di ferro sulla superficie e nell'aerosol atmosferico che ne determinano il caratteristico colore. La superficie marziana è molto eterogena, è ad esempio ricca di crateri generati da impatti meteorici, di vulcani ormai inattivi, di letti di fiumi essiccati, vallate, deserti e ghiacciai in corrispondenza dei poli.

Marte possiede un'atmosfera molto tenue e secca, composta principalmente da anidride carbonica. Nonostante lo spessore ridotto, tale atmosfera è in grado di produrre una varietà di fenomeni come venti e nubi a 25 km di altitudine dalla superficie, bassa foschia, brina. Ma il fenomeno atmosferico più appariscente è senz'altro rappresentato dalle enormi tempeste di polvere che nascono principalmente nell'emisfero meridionale e a volte si estendono all'intero pianeta, trasformandosi in tempeste globali. Anche in assenza di tali eventi, l'atmosfera di Marte è sempre ricca di polvere in sospensione, la cui abbondanza varia stagionalmente.

Nell'orbita di Marte sono presenti due satelliti: Phobos e Deimos.

In tabella 1 sono mostrati alcuni parametri del pianeta Marte confrontati con quelli terrestri.

	Marte	Terra
Massa	$0.64185 \cdot 10^{24} \text{ kg}$	$5.9736 \cdot 10^{24} \text{ kg}$
Volume	$16.318 \cdot 10^{10} \text{ km}^3$	$108.321 \cdot 10^{10} \text{ km}^3$
Raggio Equatoriale	3396.2 km	6378.1 km
Raggio polare	3376.2 km	6356.8 km
Raggio Medio	3389.5 km	6371.0 km
Raggio del Core	1700 km	3485 km
Ellitticità	0.00648	0.00335
Densità Media	3933 kg/m ³	5515 kg/m ³
Gravità ai Poli	3.758 m/s ²	9.823 m/s ²
Gravità Equatore	3.711 m/s ²	9.7801 m/s ²
Velocità di fuga	5.03 km/s	11.19 km/s
Flusso medio solare	588.98 W/m ²	1367 W/m ²

Tabella 1: Confronto tra i parametri fisici di Marte e Terra.

Il periodo di rivoluzione è di circa 687 giorni terrestri. Un anno marziano corrisponde quindi a circa 2 anni terrestri. Il periodo di rotazione, 24h 39m 35s, è solo leggermente più lungo di quello terrestre. L'inclinazione dell'asse di rotazione rispetto al piano dell'orbita (25°19' per Marte contro i 23°27' per la Terra) è tale da permettere il susseguirsi delle stagioni così come sul nostro pianeta. Però, a causa della forte eccentricità (0.0933941) dell'orbita, al perielio Marte riceve circa il 44% di radiazione solare in più che non all'afelio per cui la primavera e l'estate sono più brevi e calde nell'emisfero meridionale che in quello settentrionale. Il moto del pianeta è caratterizzato anche da oscillazioni periodiche (~10⁵ anni), che causano variazioni dell'asse di inclinazione fino a ~60° (obliquità).

L'evoluzione climatica di Marte ha analogie importanti con la Terra, come ad esempio la formazione delle calotte polari, il susseguirsi delle stagioni e gli andamenti meteorologici. Tuttavia, sono presenti anche differenze significative quali la mancanza di acqua liquida e l'inerzia termica molto più bassa.

Marte è attualmente inattivo geologicamente e non sembra presente alcuna attività tettonica. L'ipotesi più plausibile è che la struttura di Marte sia caratterizzata da un nucleo centrale metallico, un mantello e una crosta. La mappatura della superficie marziana effettuata recentemente dal Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA), a bordo di Mars Global Surveyor (MGS), ha fornito una topografia dettagliata con una risoluzione verticale assoluta inferiore a 10 metri (Figura 1.2). Da tali mappe emergono due tipi principali di regioni marziane: quelle fortemente craterizzate che caratterizzano l'emisfero sud e quelle con pochi crateri, tipicamente collocate nell'emisfero nord. Si pensa che un'attività vulcanica recente abbia rimodellato la superficie nell'emisfero nord.

Vi è una profonda differenza nell'elevazione fra emisfero nord e sud: quest'ultimo ha un'elevazione mediamente maggiore di 6 km rispetto all'altro. Al fine di spiegare questa dicotomia sono state

formulate diverse ipotesi, come un assottigliamento della crosta dell'emisfero nord dovuto a moti convettivi nel mantello (Wise et al., 1979a;b), il moto delle placche tettoniche durante la fase iniziale della storia geologica di Marte (Sleep, 1994), oppure numerosi impatti meteorici nell'emisfero nord (Wilhelms e Squyres, 1984).

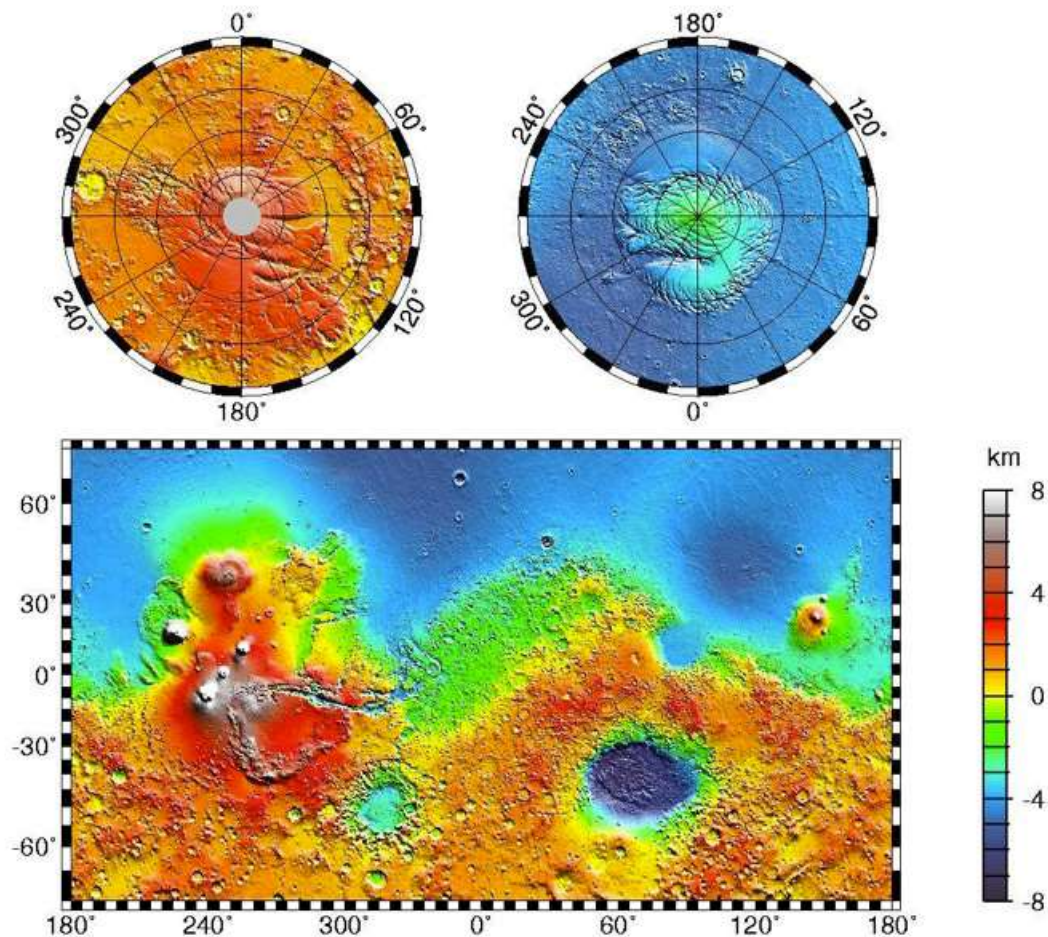


Figura. 1.2: Mappa tomografica di Marte effettuata dal MOLA strumento del Mars Global Surveyor (NASA/MOLA Science Team). Emisfero sud (in alto a sinistra), Emisfero nord (in alto a destra), mappa globale in basso.

Le due calotte polari marziane sono formate da depositi di ghiaccio secco e ghiaccio d'acqua ed altri volatili e sedimenti di polvere. Hanno uno spessore di circa 1.2-3 m ed una larghezza di circa 1.000 km.

In inverno, a causa della temperatura molto bassa, i condensati di CO_2 si sviluppano fino ad una latitudine di 60° , mentre in estate i ghiacci sublimano generando venti con velocità fino a 400 m/s, con conseguente trasporto di grandi quantità di polvere e vapore acqueo, dando luogo a nubi grandi cirro (Forget, F., et al., 2006).

1.2 Atmosfera Marziana (Composizione, Temperatura e Pressione)

Lo studio dell'atmosfera marziana è in continua evoluzione grazie ai nuovi dati forniti dagli orbiter delle missioni spaziali e all'elaborazione dei modelli teorici. I parametri più rilevanti sono mostrati in tabella 1.1. Questi parametri generalmente variano a seconda della posizione, stagione ed eventi straordinari sulla superficie di Marte.

Composizione	95.32% CO ₂ , 2.70% N ₂ , 1.60% Ar ₄₀ , 0.13% O ₂ , 0.07% CO, 0.03% H ₂ O, 0.013% NO, 5.3 ppm Ar ₃₆₊₃₈ , 2.5 ppm Ne, 0.3 ppm Kr, 0.13 ppm CH ₂ O, 0.08 ppm Xe, 0.04-0.02 ppm O ₃ , 10.5 ppb CH ₄
Pressione	6.1 mBar di media
Temperatura	215 K di media; intervallo 140-310 K
Densità	0.020 kg/m ³ (media) - 0.010-0.020 kg/m ³ (intervallo)
Viscosità	$1.4673 \cdot 10^{-5}$ Pa·s
Velocità vento	0-30 m/s
Albedo	0.25
Densità di polvere in sospensione	1-100 cm ⁻³
Dimensione dei grani in atmosfera	0.010-10 µm
Concentrazione del vapore acqueo	$1.2 \cdot 10^{-9}$ - $4.5 \cdot 10^{-6}$ kg/m ³

Tabella 1.1: Parametri caratteristici dell'atmosfera marziana.

L'atmosfera marziana è sottile, fredda e molto secca ed è composta essenzialmente da diossido di carbonio. Gli strati principali che la compongono sono: troposfera, mesosfera e termosfera (Fig 1.3). La troposfera è compresa tra 0-50 km dalla superficie marziana, mentre la mesosfera è compresa tra 50-110 Km. Al di sopra dei 110 km troviamo la termosfera dove la temperatura aumenta a causa del forte irraggiamento solare ultravioletto.

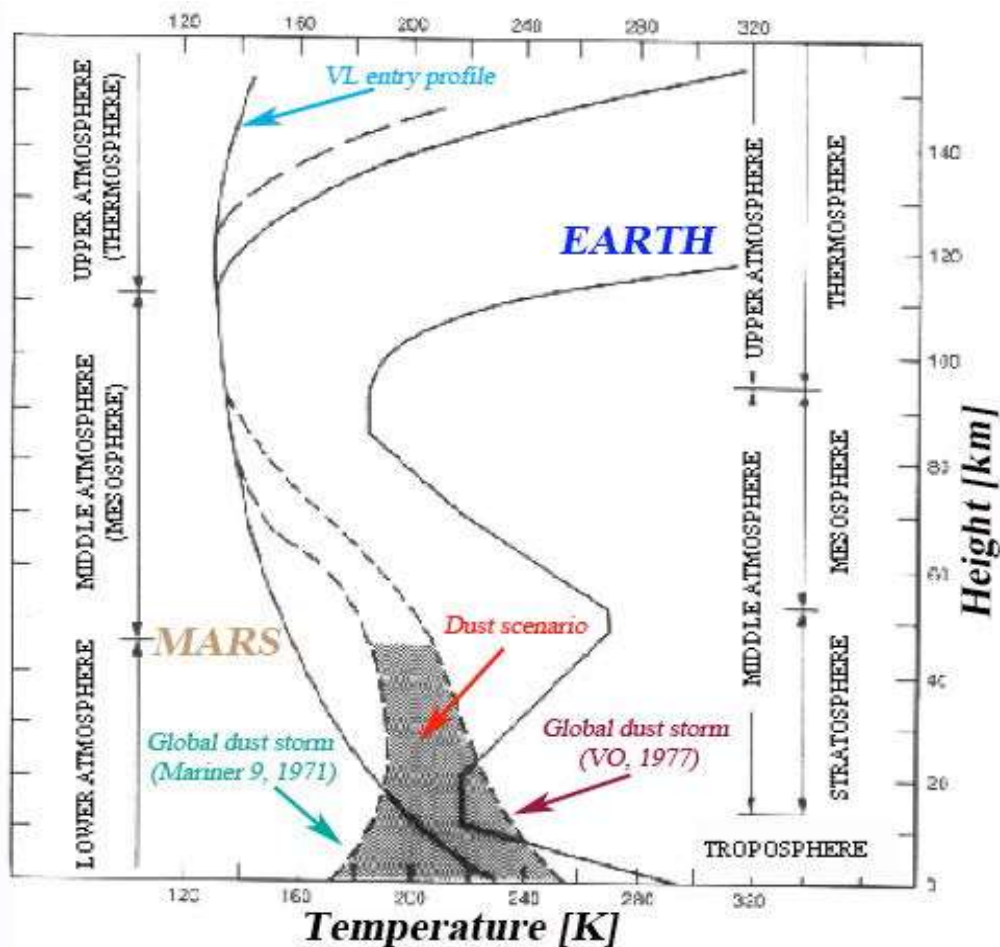


Figura 1.3 : Stati principali dell'atmosfera di Marte

La concentrazione dei gas costituenti l'atmosfera varia con l'alternarsi delle stagioni, con la latitudine e con la temperatura della superficie. Infatti, durante l'inverno, quando la temperatura ai poli si abbassa notevolmente, circa il 25% della CO_2 presente nell'atmosfera si accumula sulle calotte polari in forma di ghiaccio secco. Durante la stagione estiva l'anidride carbonica sublima e ritorna in circolo nell'atmosfera.

Tra i gas presenti in traccia, rilevati negli ultimi anni, è importante annoverare la presenza del metano. Diverse osservazioni da Terra e dallo spazio hanno infatti mostrato che il metano è presente nell'atmosfera marziana in piccole concentrazioni, variabili stagionalmente e spazialmente (V. Formisano, et al., 2004, Mumma et al., 2009; Hand, 2008). Alcuni modelli fotochimici hanno indicato che le molecole di metano sono instabili nell'atmosfera marziana a causa del forte irraggiamento solare ultravioletto. La vita media di tali molecole è stata stimata essere dell'ordine di 300-600 anni. Ciò implica la presenza su Marte di una sorgente attiva di metano. La natura di tale sorgente è ancora dibattuta e potrebbe avere origine biologica (ricordiamo che sulla Terra, circa il 90% del metano è prodotto da organismi viventi) o geologica (ossidazione del ferro, serpentinizzazione dei basalti, attività idrotermale). La controversia potrebbe essere risolta con la missione ExoMars, che nel 2016 inserirà in orbita marziana il *Trace Gas Orbiter* (TGO), ideato principalmente per rilevare, mappare e ricercare le sorgenti dei gas in traccia nell'atmosfera marziana.

La temperatura dell'atmosfera varia ovviamente con le stagioni e la latitudine. I profili verticali di temperatura sono fortemente influenzati dalla presenza di grani di polvere in sospensione a bassa quota. I grani assorbono la radiazione solare e rilasciano l'energia acquisita emettendo fotoni nell'infrarosso, riscaldando così la troposfera. Mentre, ossigeno e ozono, la cui concentrazione è massima ad una quota di 40 km, partecipano in piccola parte all'assorbimento della radiazione, l'esatto opposto di ciò che accade sulla Terra.

In caso di assenza di polvere in sospensione si osserva una diminuzione della temperatura con l'altitudine di circa 4.5 K/km (Zurek R.W., et al. 1992).

La variazione della temperatura sia annuale che giornaliera è mostrata in figura 1.4. Questa è compresa tra 140 K ai poli in inverno fino a circa 300 K a basse latitudini nel periodo estivo (Figura 1.4 (a)). Si osserva in figura 1.4 (b) un'escursione di 100 K della temperatura nella transizione giorno/notte.

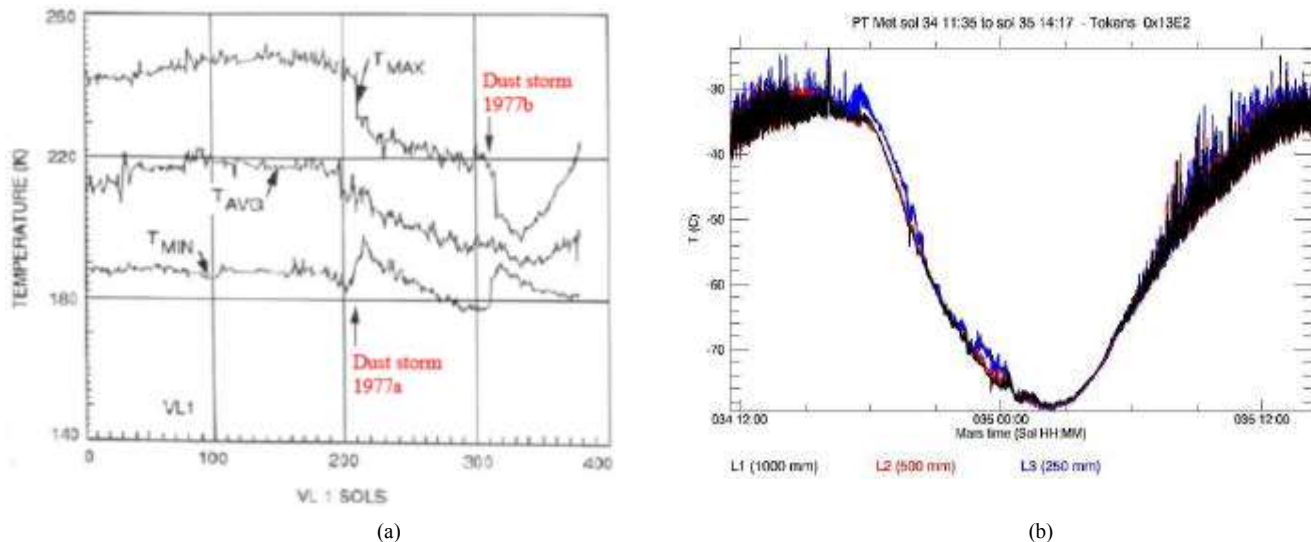


Figura 1.4 : (a) Variazione della temperatura annuale e pressione misurate dal Viking Lander 1 (Golden Plain, 22.70°N 48.22°W) ; (b) Variazione della temperatura giornaliera misurata dal rivelatore MET a bordo di Phoenix (Green Valley, 68°N 126°W, sol 34/34) (Taylor, P.A., et al., 2008).

La pressione atmosferica presente su Marte (Fig. 1.5) è circa un millesimo di quella terrestre. Il valore medio della pressione sulla superficie è di circa 6-7 mbar con un minimo di 0.2 mbar sul Monte Olimpo ed un massimo di 13 mbar in Hellas Planitia.

Variazioni considerevoli della pressione (30%) sono dovute all'effetto delle stagioni, a causa del brinamento durante l'inverno e la sublimazione in estate dell'elemento più abbondante, ovvero la CO₂. In figura 1.5 è mostrata la variazione della pressione durante un 1 sol (ossia il giorno solare medio sul pianeta Marte) misurata dalle missioni Viking e Pathfinder. La pressione varia tra i 6.6 e 7 mBar.

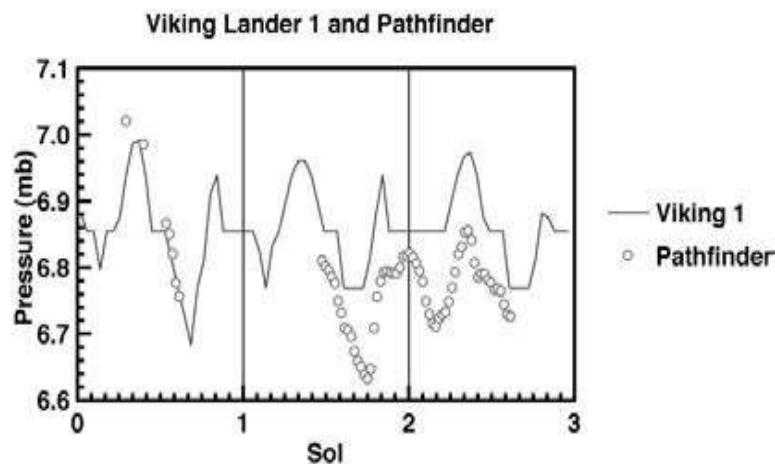


Figura 1.5: Variazione della pressione giornaliera misurata *in situ* dal Viking Lander 1 (Golden Plain, 22.70°N 48.22°W) e dal rover Mars Pathfinder (Ares Vallis, 19.13°N 33.22°W) missions NASA/JPL)

1.3 I Venti Marziani

I gradienti di Pressione e Temperatura sono la sorgente principale, per cui le masse d'aria sulla Terra come su Marte si spostano da un luogo all'altro dando vita ai venti. Su Marte i venti sono particolarmente intensi e localmente unidirezionali. Tipicamente l'intensità del vento varia tra i 2-7 m/s in estate, 5-10 m/s in autunno e durante le tempeste di sabbia va da 17 a 40 m/s.

I venti giocano un ruolo fondamentale nel trasporto e nel sollevamento della polvere come sarà discusso in seguito. I profili di vento terrestre, marziano e venusiano sono confrontati in figura 1.6.

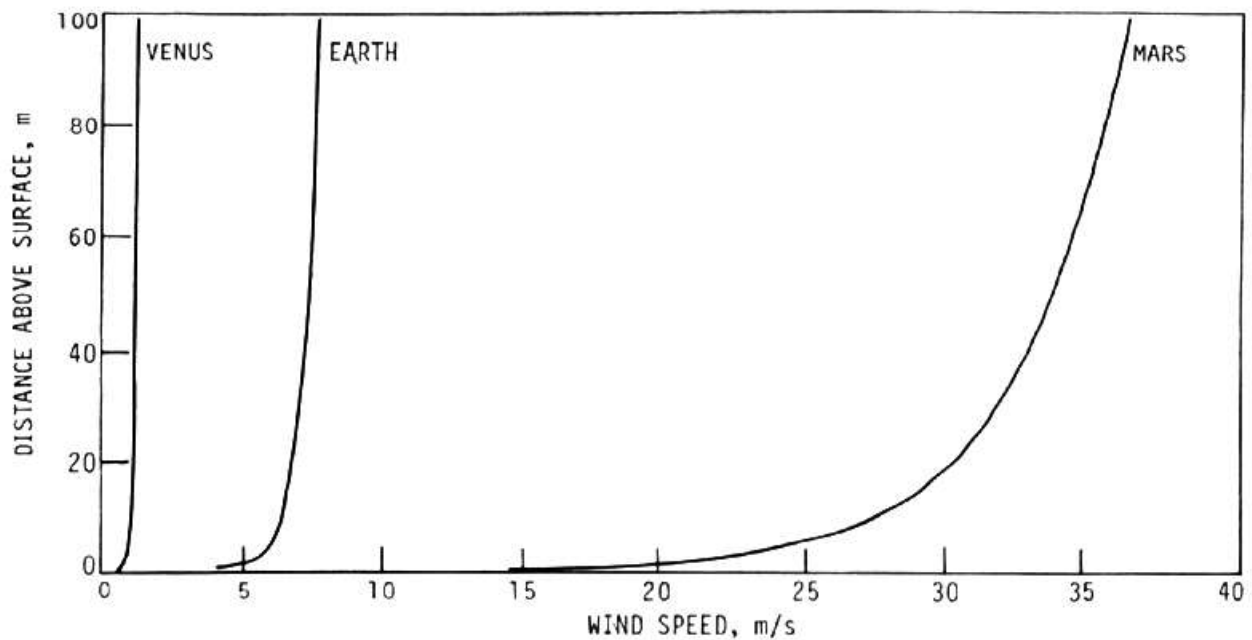


Figura 1.6: Confronto tra i profili logaritmici dell'andamento dei venti di Venere, Terra e Marte.

La dinamica globale dell'atmosfera marziana è regolata dalla cella di Hadley. Questa fa riferimento ad un tipo di moto dell'atmosfera tipicamente convettivo. Sulla Terra la cella di Hadley (figura 1.7) sposta una massa d'aria calda dall'equatore fino ai poli. In questo modo si ottiene una circolazione d'aria da una zona calda verso una zona fredda.

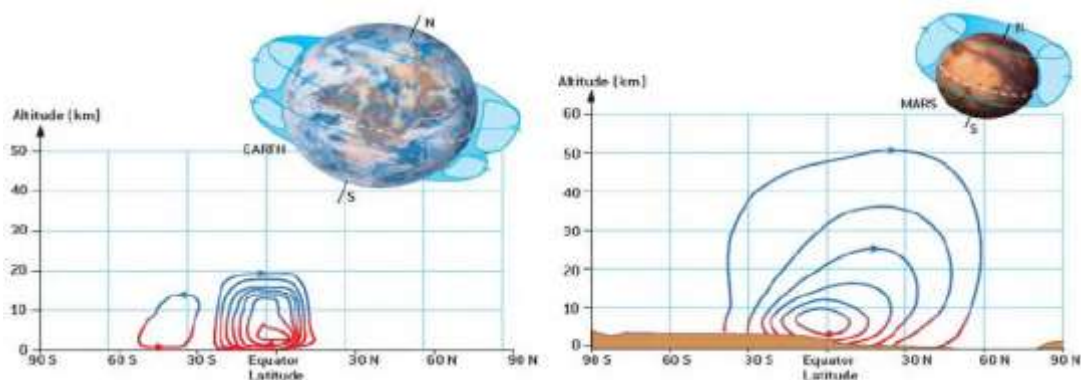


Figura 1.7 : Celle di Hadley su Terra e Marte.

1.4 Polvere atmosferica

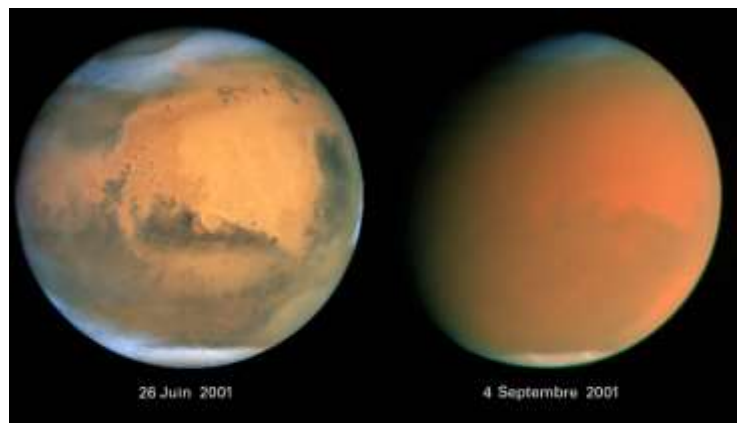
La polvere su Marte gioca un ruolo fondamentale nell'evoluzione del pianeta. La sua concentrazione è variabile e dipende dalle stagioni, dall'area geografica e dall'occorrenza di particolari eventi meteorologici quali i *dust devils*, ossia vortici di polvere e tempeste di polvere (Fig. 1.8). La presenza della polvere in sospensione incide profondamente sul clima marziano. I grani assorbono e diffondono la radiazione solare e termica e agiscono da nuclei di condensazione per H₂O e CO₂ influenzando così la struttura termica, il bilancio e la circolazione dell'atmosfera (James et al 1992; Jakosky and Haberle 1992; Kahn et al 1992; Ryan and Henry 1979; Forget et al. 2006; Martin and Kieffer 1979; Martin 1981; Jakosky and Martin 1987).

I parametri principali dei grani che influenzano il riscaldamento dell'atmosfera sono la distribuzione dimensionale, l'albedo, la parte immaginaria dell'indice di rifrazione.

La polvere inoltre ha avuto effetti a lungo termine anche sulla geologia della superficie. Infatti, attualmente, il vento e i grani minerali trasportati da questo, costituiscono il processo attivo che maggiormente impatta sull'evoluzione della morfologia della superficie. Gli imponenti campi di dune, le variazioni periodiche di albedo della superficie, l'erosione eolica, la ridistribuzione della polvere sulla superficie e l'alterazione meccanica sono tutti fenomeni riconducibili all'interazione superficie-atmosfera e sono guidati dall'intensità del vento e dalle proprietà dei grani (principalmente la dimensione).



(a)



(b)

Figura 1.8 : (a) un esempio di dust devil e di tempeste di polvere globale (b) su Marte

Le informazioni attualmente disponibili sulla polvere provengono principalmente dalle misure di profondità ottica τ effettuate dalle diverse missioni spaziali in orbita intorno a Marte.

La profondità ottica è la misura della trasparenza dell'atmosfera e si esprime come:

$$\tau = -\log \frac{I}{I_0} \quad (1.1)$$

dove I_0 rappresenta l'intensità della radiazione incidente che penetra l'atmosfera, I è l'intensità di radiazione osservata e riflessa dalla superficie marziana. Di conseguenza, il parametro τ indica quanta radiazione, che ha attraversato l'atmosfera, è stata assorbita ed in seguito diffusa. La presenza di polvere incide fortemente su τ poiché i grani assorbono e diffondono luce.

La presenza di polvere in sospensione in atmosfera è evidente dal colore del cielo marziano che varia dal giallo scuro al blu e al nero. Ovviamente la misura della profondità ottica è influenzata anche dalla presenza di grani di ghiaccio d'acqua (Pollack, JB, et al, 1977; Colburn, D., et al, 1989; Leovy, CB, et al, 1972; Anderson, E.M., Leovy, C.B., 1978; Jaquin, F., et al., 1986; Kahn, R.A., 1990). In

figura 1.9 e 1.10 è mostrata la distribuzione spaziale delle polveri durante un anno Marziano relativamente all'emisfero nord ed emisfero sud.

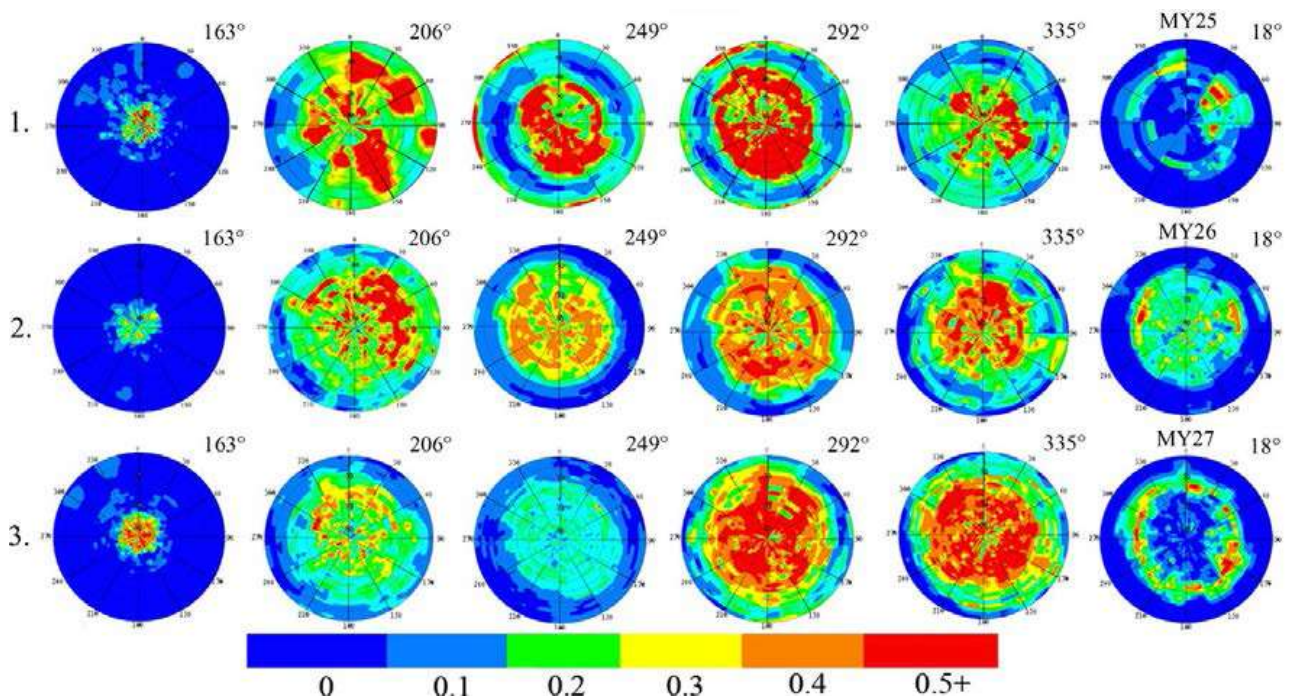


Figura 1.9: Distribuzione spaziale della polvere (profondità ottica) durante un anno Marziano nell'emisfero nord; dati acquisiti dallo spettrometro TES a bordo della missione Mars Global Surveyor – MGS. (Horne, D., Smith, M.D., 2009)

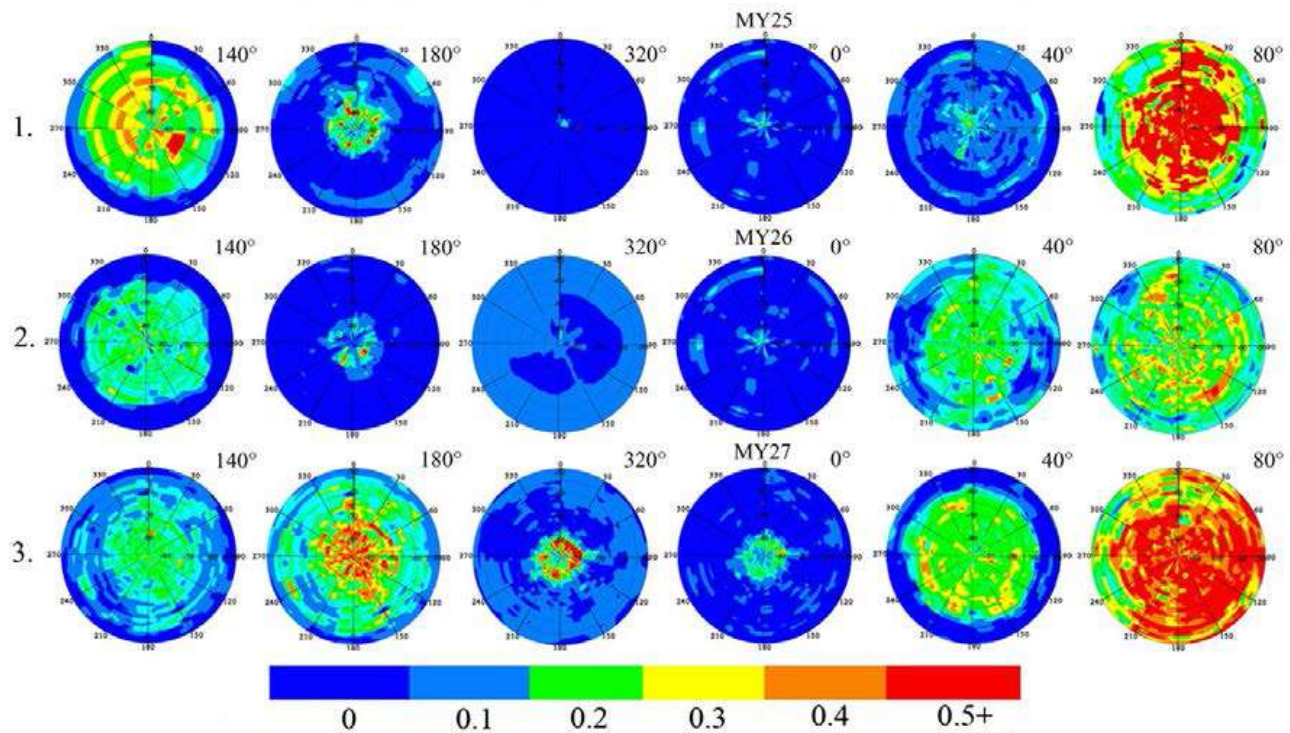


Figura 1.10: Distribuzione spaziale della polvere (profondità ottica) durante un anno Marziano nell'emisfero sud, dati di TES/MGS (Horne, D., Smith, M.D., 2009).

Ci sono forti evidenze che la polvere su Marte sia distribuita globalmente con una composizione mineralogica simile sull'intero pianeta (Pollack, J.B. , et al. 1977,1979).

Gli spettri acquisiti da misure in remoto suggeriscono una mineralogia dominata da silicati (probabilmente feldspati), con minori abbondanze di olivina, pirosseno, materiali amorfi, ematite e magnetite e che la polvere è il prodotto dell'alterazione meccanica (*weathering*) di rocce basaltiche con minime alterazioni chimiche (Hamilton et al., JGR, 110, E12006, 2005).

La conoscenza delle proprietà della polvere atmosferica, dei meccanismi di sollevamento e immissione in atmosfera e del tasso di deposizione risultano quindi importanti per comprendere il clima e l'evoluzione della superficie di Marte. Sono di grande interesse anche ai fini della programmazione di missioni spaziali future. La conoscenza dell'abbondanza della polvere che si deposita sui pannelli solari e la dimensione e forma delle particelle costituiscono elementi cruciali per il disegno di missioni che verranno alimentate da pannelli solari per diversi anni e che saranno equipaggiate da parti mobili che possano essere danneggiate/degradate dalla presenza della polvere. Tale informazione è essenziale anche per pianificare missioni umane in relazione alla caratterizzazione dei fattori di rischio ambientali.

Attualmente, le informazioni relative alla struttura e dinamica delle polveri è alquanto limitata. La distribuzione dimensionale è nota grossolanamente e i meccanismi di sollevamento ed emissione in atmosfera, il tasso di deposizione e la variabilità geografica sono ancora oggetto di controversia.

La dinamica della polvere su Marte è regolata dal ciclo della polvere rappresentato in figura 1.11.

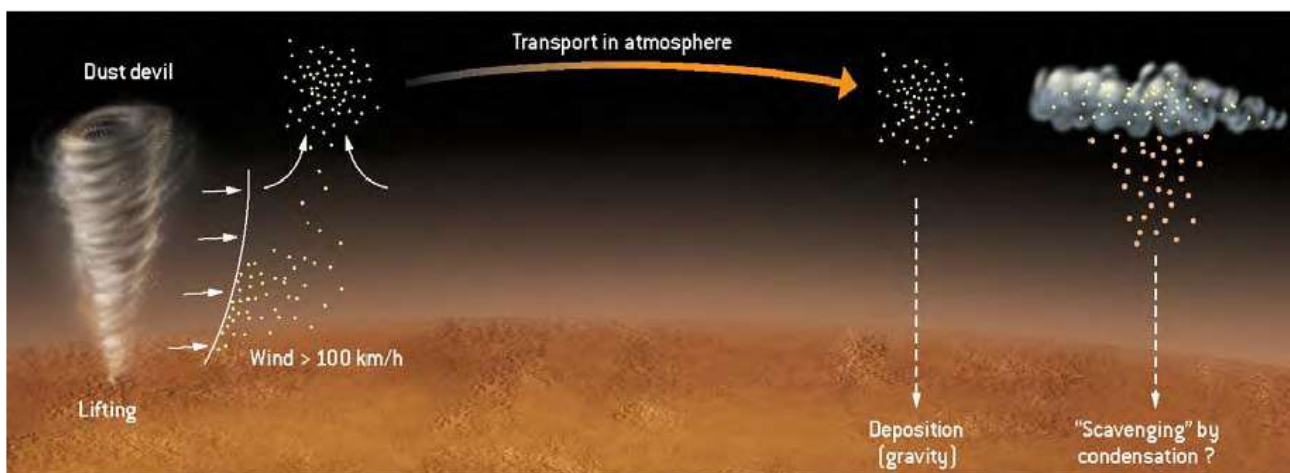


Figura 1.11: Ciclo di polvere nell'atmosfera marziana (Forget, F., et al, 2006).

Tale ciclo (F.M. White 1979) è caratterizzato principalmente da tre processi: sollevamento, trasporto e deposizione. Il sollevamento (D.W. Griffin, C.A. Kellogg, E.A. Shinn – 2001) è innescato dal processo di 'saltazione': quando la velocità del vento supera una certa soglia, le particelle da 70-250 μm (ossia i grani di sabbia) sono le prime ad essere messe in movimento. Questi si muovono sul suolo lungo traiettorie balistiche in cui impattano e mobilitano altre particelle. I grani di polvere ($< \sim 70 \mu\text{m}$) sono strettamente legati al suolo da forze di coesione e necessitano quindi di venti molto più intensi per essere mobilitati. Questi vengono generalmente portati in sospensione attraverso gli impatti delle particelle di sabbia in saltazione, che gli trasferiscono sufficiente quantità di moto da rompere le forze di coesione.

I grani immessi in atmosfera, sotto la spinta del vento possono percorrere migliaia di chilometri. Questo fenomeno è chiamato trasporto.

Il trasporto dei grani di polvere può avvenire per migliaia di chilometri o pochi metri a seconda della dimensione dei grani coinvolti nel processo. Definiamo il trasporto a lungo termine quando i grani trasportati dal vento hanno dimensione minore di 20 micron, mentre il trasporto a breve termine interessa i grani di polvere con dimensione compresa tra i 20 e i 70 micron.

Il meccanismo di sollevamento e trasporto sono rappresentati in figura 1.12.

I grani in saltazione possono anche colpire grani di grandi dimensioni (< 1 cm) e spingerli lungo la superficie in un moto di strisciamento (*creep*).

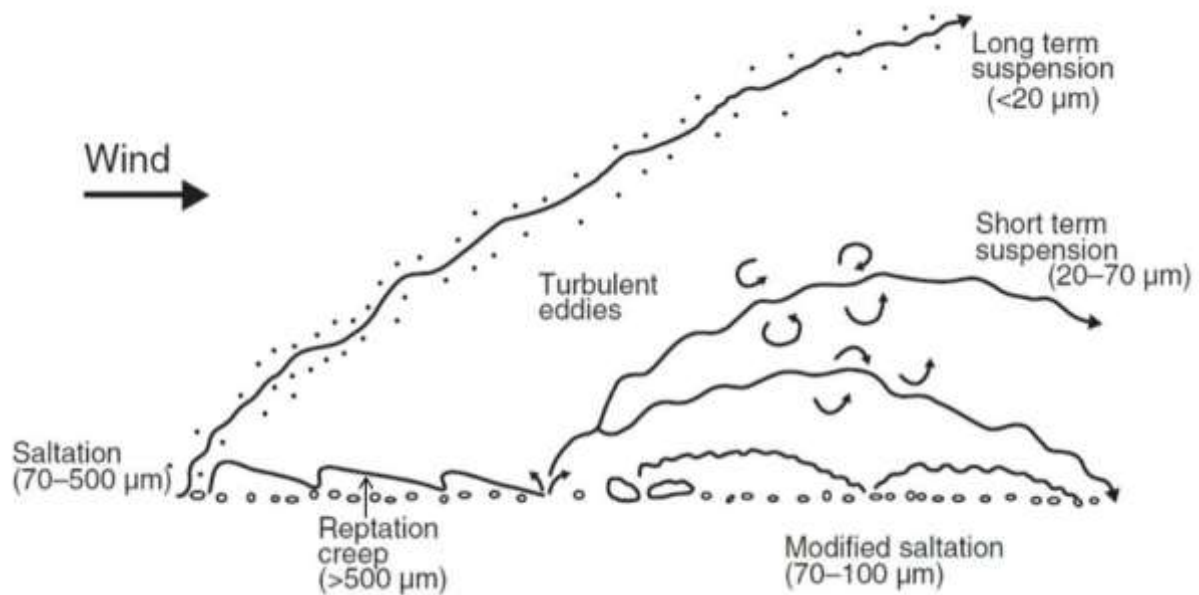


Figura 1.12: Meccanismo di sollevamento delle polveri

Affinchè le polveri si sollevino, il vento deve superare una certa soglia di velocità che varia a seconda della dimensione dei grani che si spostano. Sono state elaborate diverse teorie che descrivono la dipendenza della dimensione del grano sollevato dalla soglia della velocità di taglio del vento u_{*t} . (Bagnold, 1941; Iversen et al., 1976; Iversen e White, 1982; Shao e Lu, 2000), indicate in figura 1.13. L'espressione ottenuta da Shao e Lu si scrive:

$$u_{*t} = A_N \left(\frac{\rho_p - \rho_a}{\rho_a} g D_p + \frac{\gamma}{\rho_a D_p} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.2)$$

dove A_N è un parametro adimensionale che dipende da Re_{*t} , Re_{*t} è il numero di Reynolds della particella al valore di soglia della velocità di taglio del vento, ρ_p è la densità delle polveri, ρ_a la densità dell'aria, D_p il diametro delle polveri, g l'accelerazione di gravità e γ un parametro che scala l'intensità delle forze di coesione.

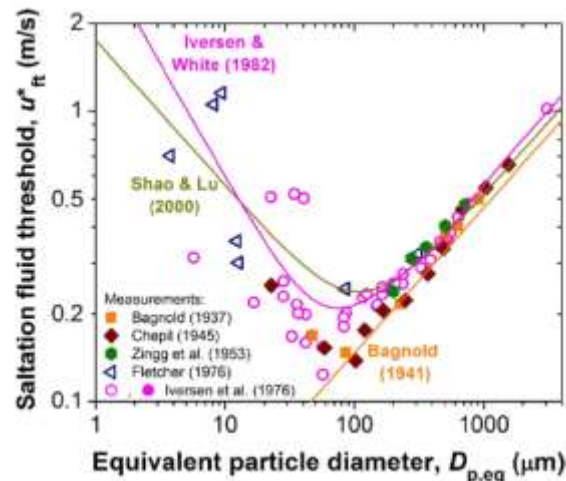


Figura 1.13: Espressioni semi-empiriche (linee colorate) e misure (simboli) delle velocità di taglio di soglia richieste per iniziare la saltazione in condizioni ambientali terrestri.

Sebbene la saltazione sia il meccanismo principale con cui la polvere viene immessa in atmosfera sulla Terra, il suo ruolo su Marte è ancora dibattuto. Le misure sporadiche effettuate dai lander suggeriscono che la velocità di soglia u_{*f} viene superata raramente nella tenue atmosfera marziana (Zurek et al., 1992; Sullivan et al., 2000; Holstein-Rathlou et al., 2010). Ciò è consistente con le simulazioni dei modelli di circolazione sia di mesoscala (Fenton et al., 2005; Chojnacki et al., 2011) che di scala globale (Haberle et al., 2003). Ma questi risultati sono difficili da conciliare con le più recenti osservazioni di trasporto attivo in molte aree della superficie di Marte (Fenton et al., 2005; Fenton 2006; Greeley et al., 2006; Sullivan et al., 2008; Bourke et al., 2008; Geissler et al., 2010; Silvestro et al., 2010; 2011; Chojnacki et al., 2011; Hansen et al., 2011; Bridges et al., 2012b; Kok 2012) che, almeno in alcuni casi, risultano in flussi di sabbia simili a quelli delle dune terrestri (Bridges et al., 2012a). Queste osservazioni contraddittorie potrebbero essere in parte spiegate dal fatto che la topografia a piccola scala e i moti convettivi possono generare venti localizzati molto intensi che non possono essere simulati accuratamente con la bassa risoluzione dei modelli di circolazione atmosferica marziana (Fenton e Michaels, 2010). Inoltre, risultati recenti mostrano che, una volta che tali forti venti abbiano iniziato il processo di saltazione, questo possa essere sostenuto da venti con velocità inferiori di un fattore ~ 10 (Kok 2010a; 2010b).

In ogni caso, sono stati proposti anche altri meccanismi in grado di sollevare la polvere che non coinvolgono la saltazione, come la disgregazione dei deboli agglomerati di polvere osservati dai Mars Exploration Rovers (MER) della NASA (Sullivan et al., 2008), i dust devils (Balme e Hagermann, 2006; Neakrase e Greeley, 2010b), la termoforesi (Wurm et al., 2008), la rapida sublimazione del ghiaccio di CO_2 presente sui grani di polvere (Holstein-Rathlou et al., 2010).

Misure accurate *in situ* delle proprietà della polvere, tra cui abbondanza e distribuzione dimensionale al variare delle condizioni meteorologiche, potranno contribuire alla comprensione dei meccanismi principali responsabili per l'emissione della polvere su Marte.

Attualmente le informazioni sulla distribuzione dimensionale e sull'abbondanza della polvere in sospensione sono state ricavate principalmente da misure ottiche in remoto (Fig. 1.14) Toon et al., 1977; Drossart et al., 1991; Pollack et al., 1995; Tomasko et al., 1999).

I parametri relativi ai grani sono stati in questo caso ricavati a partire da alcune assunzioni importanti quali la forma della distribuzione dimensionale (assunta *ad hoc*). In ogni caso, non è disponibile alcuna stima delle dimensioni e dell'abbondanza delle particelle di polvere primarie (ossia di quelle appena entrate in sospensione).

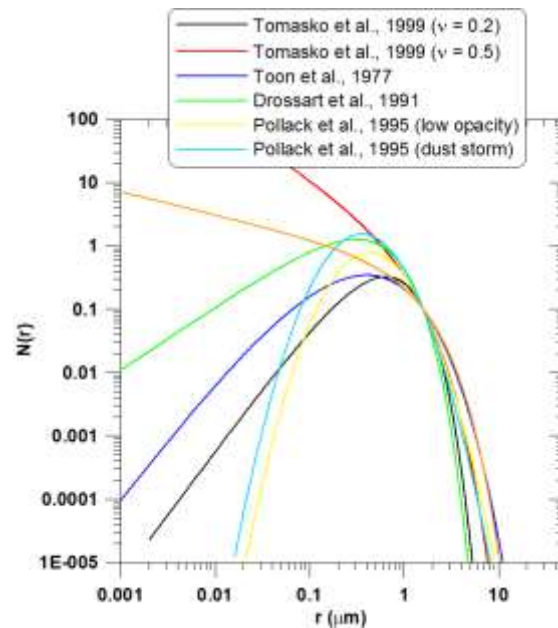


Figura 1.14: Confronto delle distribuzioni dimensionali della polvere in atmosfera marziana ottenute da vari autori. Le curve sono scalate in maniera tale da avere $N = 0.1$ per $r = 1.6 \mu\text{m}$.

1.4.1 Tempeste di sabbia, Dust Devils e Campi Elettrici

Come accennato precedentemente, il clima di Marte e il ciclo della polvere possono essere influenzati da eventi speciali come le tempeste di polvere e i Dust Devils. Essi rappresentano i fenomeni più comuni che interessano l'atmosfera di Marte. Le tempeste di polvere (Fig. 1.15) nascono generalmente nel periodo primavera-estate dell'emisfero meridionale, ossia in seguito al passaggio del pianeta al perielio, poiché in questo momento il riscaldamento e la circolazione dell'atmosfera sono massimi. Le tempeste sono generalmente di natura locale o regionale ma possono evolvere in tempeste globali coinvolgendo l'intero pianeta. L'evoluzione delle tempeste da regionali a globali è un fenomeno ancora non compreso e attualmente non predicibile. Le tempeste di polvere sono i principali protagonisti della distribuzione di polvere su Marte.

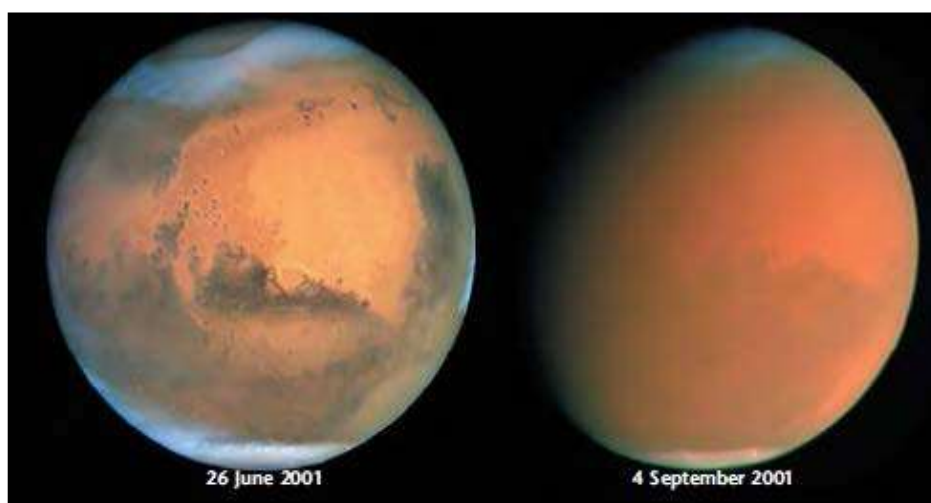


Figura 1.15 : Dust Storm

Le tempeste sono causate dai forti venti che muovono la sabbia innescando la saltazione, che è responsabile dell'immissione di polvere in atmosfera. Una tempesta di polvere riesce ad erodere,

trasportare e depositare un enorme quantitativo di sabbia e polvere incidendo sulla morfologia e la chimica della superficie di Marte.

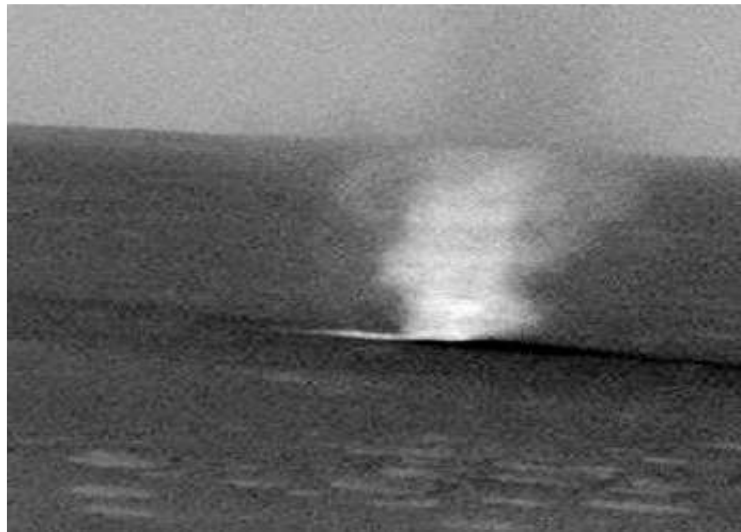


Figura 1.16: Dust Devils

I Dust Devils (Fig. 1.16), sono dei vortici di dimensione variabile che sollevano polvere. La formazione dei Dust Devils è causata da un eccessivo surriscaldamento della superficie di un suolo secco e caldo (Sinclair, PC, 1969; Greeley, R., 2003. Ferri, F., et al, 2003; Balme, M., Hagermann, A., 2006) che, in presenza di una leggera depressione sovrastante, genera un mulinello di aria che può crescere in dimensioni e in potenza. L'aria surriscaldata, essendo meno densa, per la spinta di Archimede tende infatti a dirigersi verso l'alto, richiamando nuova aria dall'ambiente circostante. Se al vortice è associato un movimento rotatorio derivante dall'ingresso non uniforme dell'aria dai suoi fianchi, questa rotazione si intensifica nello stiramento verticale che l'aria calda subisce durante la sua risalita, a causa della conservazione del momento angolare. Questo avvitaimento viene quindi amplificato dando luogo al caratteristico vortice, che poi si sposta sul terreno in funzione dell'afflusso di nuova aria.

L'afflusso di aria relativamente calda dalle aree circostanti mantiene in equilibrio il vortice, che nella sua corsa è in grado di raccogliere e aspirare polvere e sabbia. Quando infine il vortice arriva su una superficie relativamente fredda, non ha più l'energia e il tempo per riscaldare la nuova aria e quindi l'equilibrio si rompe, provocando il rapidissimo collasso della tromba d'aria e il suo conseguente dissolvimento.

I Dust Devils contribuiscono fortemente alla morfologia marziana perché sollevano e trasportano polvere. Generalmente rimuovono quello strato sottile di polvere compattata generatasi dopo le tempeste, causando cambiamenti di albedo (Malin, MC, Edgett, KS, 2001).

I Dust Devils sono stati osservati per la prima volta dalle camere a bordo dell'orbiter e del lander della missione Viking 1 (Thomas, P., Gierasch, PJ, 1985; Ryan, JA, Lucich, RD, 1983; Ringrouse, TJ, et al., 2003). Numerosi eventi sono stati osservati anche da Mars Pathfinder (Metzer, SM, et al., 1999; Ferri, F., 2003), MER-A e MER-B (Greeley, R., et al., 2006), Mars Express (Stanzel, C., et al. 2008), Mars Global Surveyor (Cantor, BA, et al., 2006). Le numerose osservazioni testimoniano la frequenza di tali fenomeni nel periodo primavera-estate dell'emisfero meridionale, confermata anche dalla elevata opacità del pianeta osservata in tale periodo (Fig. 1.17) (Thomas, P., Gierasch, PJ, 1985; Biener, KK, et al., 2002).

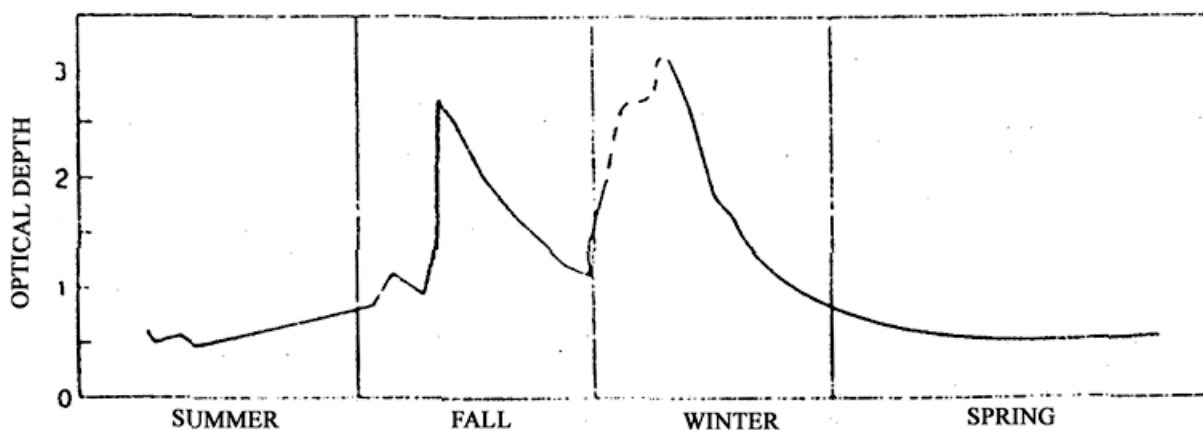


Fig. 1.17: Opacità atmosferica durante un anno marziano (sito di atterraggio della missione Viking, Haberle, R.M., 1986).

Possiamo quindi suddividere l'anno marziano in due periodi rispetto alle attività relative alle polveri:

- Stagione 'pulita': autunno e inverno dell'emisfero sud, in cui si verificano poche tempeste di polvere, con una bassa concentrazione di polveri sospese nell'atmosfera.
- Stagione della polvere: primavera ed estate dell'emisfero sud, in cui sono presenti molteplici tempeste di polvere che possono evolvere anche in tempeste globali con durate anche di diversi giorni.

Durante le tempeste di polvere sulla Terra (Fig. 1.18), sono stati misurati campi elettrici di elevata intensità 100-150 V/m. Questo fenomeno potrebbe verificarsi anche su Marte. I campi elettrici sono generati durante il processo di saltazione. L'urto tra le particelle che impattano il suolo trasferisce oltre all'energia necessaria per sollevare le polveri anche carica elettrica. Alcuni modelli e misure sia in laboratorio che su campo, indicano che il trasferimento della carica dipende dalla dimensione dei grani coinvolti nella collisione. Generalmente la particella più piccola acquisisce carica negativa rispetto a quella di dimensione maggiore. Considerando quindi che le particelle più piccole (polvere) entrano in sospensione e sono trasportate ad alte quote in atmosfera mentre le particelle più grandi (sabbia) rimangono vicine alla superficie, si crea una separazione di cariche che genera un campo elettrico. Tale campo è tanto più intenso quanto maggiore è la polvere immessa in atmosfera.

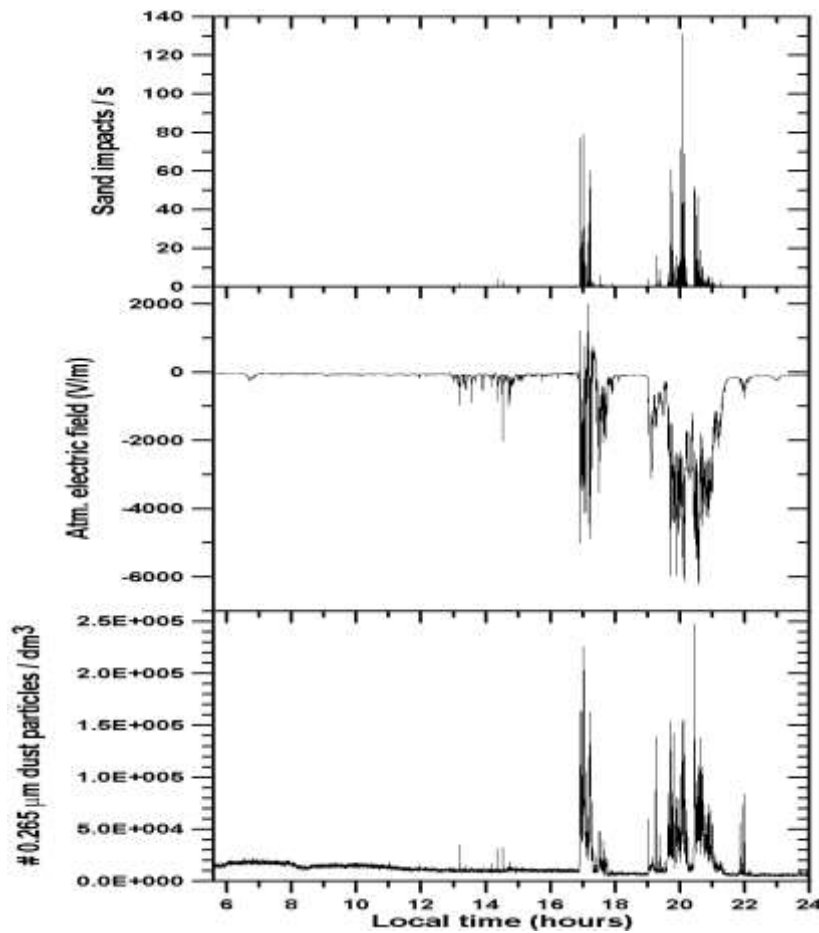


Figura 1.17: Misura del campo elettrico durante una tempesta di sabbia deserto del Sahara. (Esposito et al., in preparazione)

Lo scambio di carica tra le particelle durante l'urto è ancora un fenomeno alquanto sconosciuto. Infatti sono in corso studi e campagne di misure per comprendere quanto la dimensione dei grani, la composizione chimica e mineralogica delle polveri influisca sulla genesi dei campi elettrici oltre che sull'intensità.

2. Contatori ottici di particelle-OPC (Optical Particle Counter)

2.1 Tecniche di misurazione delle polveri marziane

La misura della distribuzione dimensionale e delle proprietà fisiche delle polveri presenti nell'atmosfera marziana si basa su due diverse tecniche: il telerilevamento e il monitoraggio in situ. Il telerilevamento è una tecnica che prevede una misura indiretta delle proprietà delle polveri ed avviene tramite l'uso di sensori installati su orbiter o lander. Il monitoraggio in situ prevede la realizzazione di sensori che effettuano una misura diretta del campione, interagendo con esso.

Il telerilevamento è la tecnica più utilizzata nel campo planetario; infatti tutte le missioni spaziali che hanno interessato il pianeta Marte, sono state equipaggiate con sensori basati su telerilevamento per l'analisi chimico-fisica dell'atmosfera, delle polveri e della superficie marziana.

La tecnica del telerilevamento analizza la radiazione termica emessa e/o la radiazione solare diffusa dalla porzione di atmosfera, dalla polvere contenuta in essa e dalla superficie del pianeta che entra nel campo di vista del rivelatore. I costituenti dell'atmosfera, le polveri e la superficie assorbono la radiazione solare e termica e la riemettono a varie lunghezze d'onda.

La radiazione diffusa dipende dalla composizione chimica, abbondanza relativa, caratteristiche ottiche, proprietà fisiche e da fattori geometrici.

Quindi studiandone lo spettro (l'andamento della radiazione al variare della lunghezza d'onda) si risale alle proprietà geometriche, fisiche, chimiche, e ottiche della porzione di atmosfera e superficie osservata dal sensore. In genere, per ottenere informazioni sulla distribuzione granulometrica della polvere in sospensione nell'atmosfera con la tecnica di telerilevamento bisogna formulare delle ipotesi ad hoc che riguardano la morfologia e la composizione delle polveri. Anche la forma della distribuzione viene scelta a priori. La misura della distribuzione dimensionale e della densità numerica della polvere risulta quindi affetta da una grande incertezza. Inoltre, i dati sono relativi all'intera colonna atmosferica analizzata, con scarse informazioni sullo strato prossimo alla superficie, dove inizia il processo di immissione della polvere in sospensione.

L'analisi della granulometria della polvere sospesa nell'atmosfera marziana è stata effettuata generalmente attraverso misure spettroscopiche (ad esempio, TES, Emission Thermal Spectrometer, a bordo di Mars Global Surveyor) o misurazioni LIDAR (ad esempio, LIDAR a bordo di Phoenix Lander) che hanno fornito informazioni sulla distribuzione dimensionale media della polvere e sulla concentrazione numerica. In particolare dalla misura della profondità ottica eseguita con TES è stato estrapolato il raggio efficace delle polveri in sospensione pari a $r_{eff} = 1.5 \pm 0.1 \mu\text{m}$, (R. Todd Clancy 2003) valore consistente con i dati forniti da Pathfinder e Viking/Mariner 9.

Nell'approccio in situ il monitoraggio del campione è diretto, quindi permette di superare alcuni inconvenienti che interessano l'approccio del telerilevamento. Il monitoraggio diretto prevede due tecniche di analisi del campione: la raccolta e l'analisi in situ o analisi di laboratorio dopo l'acquisizione del campione. Quest'ultima soluzione richiede solitamente sofisticate tecniche di manipolazione del campione e l'applicazione di procedure spesso distruttive, che, generalmente, non sono adatte per la ricerca planetaria.

L'unico tentativo di effettuare il monitoraggio diretto della granulometria della polvere atmosferica sulla superficie di Marte fu eseguito dall'esperimento MAE (Material Adherence Experiment) a bordo della missione Mars Pathfinder. L'esperimento MAE aveva due sensori: una cella solare di GaAs, ed una microbilancia QCM.

La cella solare se illuminata dal Sole fornisce un segnale elettrico, ma se la polvere si deposita sulla cella del sensore, questa viene oscurata e il sensore restituisce un segnale elettrico di minore intensità. Questo sensore fornisce una misura della variazione di efficienza dei pannelli solari dovuta al deposito della polvere. Infatti stimò una perdita giornaliera di efficienza della cella solare pari a 0.29 %.

Il secondo sensore sfruttava una QCM per misurare il peso per unità di superficie della polvere depositata sul sensore stesso. Una QCM si compone di cristalli di quarzo risonanti, in questo caso disposti verticalmente, e la misura viene effettuata rilevando elettricamente la variazione della frequenza di risonanza legata all'incremento della massa della polvere depositata sul cristallo superiore (esposto all'ambiente marziano). Quest'ultimo esperimento era condotto in simultanea all'altro e con le stesse modalità. Dal QCM di MAE non si è riusciti a ricavare nessuna informazione utile sulla distribuzione dimensionale della polvere.

Una tecnica in situ, ampiamente sviluppata per applicazioni terrestri ma mai utilizzata in missioni planetarie, si basa sul rilevamento ottico. Questo permette di determinare le proprietà della polvere analizzando la luce diffusa dai grani di polveri nell'attraversare una regione illuminata da una sorgente laser. Con questa tecnica è possibile ottenere una misura diretta delle caratteristiche granulometriche, fisiche, chimiche e geometriche della polvere. In ambito terrestre sono stati realizzati innumerevoli sensori, gli OPC (Optical Particle Counter), basati sul rilevamento ottico.

Gli OPC si dividono in SPC (Single Particle Counter) e MPCs (Multiple Particle Counters). Gli SPC misurano con alta risoluzione le caratteristiche della polvere grano per grano, mentre gli MPCs misurano con una risoluzione nettamente inferiore le proprietà di una distribuzione di polvere.

Gli OPC terrestri non sono adatti a lavorare in ambiente marziano perché il sistema di aspirazione delle polveri è disegnato per operare alle pressioni terrestri.

Il lavoro di dottorato ha previsto la realizzazione di un OPC per la misura diretta della polvere in sospensione su Marte.

2.2 Principi di funzionamento

Uno strumento capace di misurare l'abbondanza e la distribuzione dimensionale delle particelle presenti in un ambiente è il contatore ottico di particelle (OPC). Questo strumento conta e misura la dimensione delle particelle. Il principio di funzionamento degli OPC si basa essenzialmente su tre fenomeni fisici: estinzione della luce, diffusione della luce e immagine diretta.

Indipendentemente dal principio di funzionamento, gli OPC utilizzano una sorgente luminosa, che genera una regione illuminata chiamata volume di campionamento, e un fotorivelatore. Analizziamo in dettaglio i principi di funzionamento. Gli OPC progettati per rivelare le particelle attraverso l'estinzione della luce (vedi figura 2.1) utilizzano la sorgente luminosa continua e un fotorivelatore. La sorgente continua punta direttamente sul fotorivelatore il quale restituisce un segnale in corrente costante. Quando la particella attraversa il volume di campionamento oscura la sorgente impedendo alla luce di colpire il fotorivelatore. Il fotorivelatore al passaggio della particella fornirà un segnale minore dipendente dalla dimensione della particella e dalla sua capacità di assorbire luce (ossia dalle costanti ottiche del materiale di cui è composta).

Gli OPC progettati per funzionare ad immagine diretta (Figura 2.2) utilizzano una sorgente di luce costituita da una lampada alogena molto potente, un sistema di lenti e un CCD ad alta risoluzione. Le particelle attraversando il volume di campionamento, diffondono la luce che è raccolta dal sistema di lenti e convogliata sulla CCD che registra l'ombra della particella proiettata sul rivelatore.

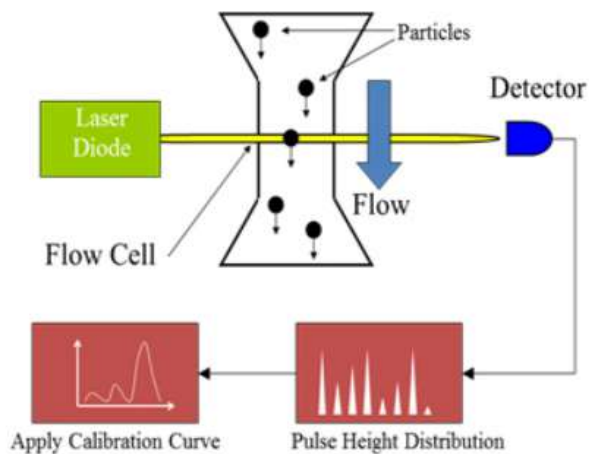


FIGURA 2.1: PRINCIPIO DELL'ESTINZIONE DELLA LUCE

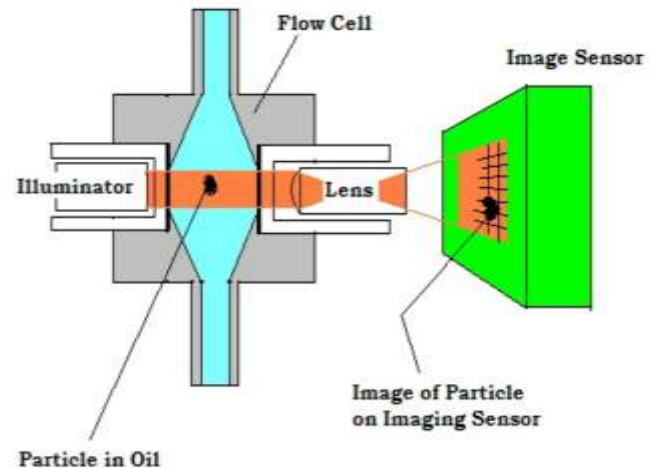


FIGURA 2.2: PRINCIPIO DELL'IMMAGINE DIRETTA

Gli OPC basati sulla diffusione della luce (figura 2.3) utilizzano una sorgente di luce (tipicamente un laser monocromatico), una lente e un fotorivelatore. Il fotorivelatore, diversamente dal sistema di estinzione, è posizionato a 90° rispetto alla direzione del fascio laser, misurando la luce diffusa dalla particella rispetto ad un certo angolo. La luce è raccolta da uno specchio che la focalizza sul fotorivelatore. Il segnale che restituisce il fotorivelatore dipende dalla dimensione della particella ma anche dalla sua forma ed indice di rifrazione.

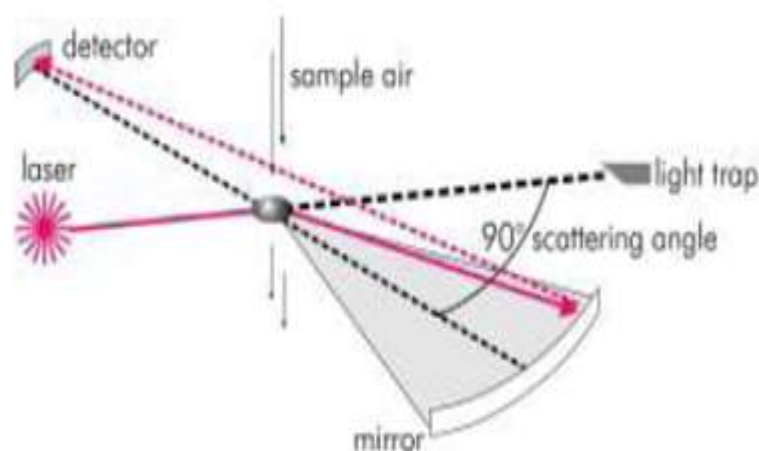


FIGURA 2.3: PRINCIPIO DELLA DIFFUSIONE DELLA LUCE

L'intervallo dimensionale delle particelle rilevabili dagli OPC dipende dal principio di funzionamento su cui si basano. Per gli OPC basati sull'estinzione della luce, la particella più piccola rivelabile avrà la dimensione di $1\mu\text{m}$, mentre per gli OPC che si basano sull'immagine diretta sarà possibile rilevare particelle con dimensione $>0.1\mu\text{m}$. Gli OPC che invece sfruttano il principio della diffusione possono rilevare particelle fino a $0.05\mu\text{m}$.

In commercio sono presenti varie tipologie di OPC che misurano diversi intervalli dimensionali, dalle polveri ultrasottili di pochi nanometri di diametro, alle polveri di dimensione di centinaia di micron. Nell'immagine 2.4 sono mostrati due tipi di OPC con diversi intervalli di misura.



FIGURA 2.4: ESEMPI DI OPC COMMERCIALI

2.3 Luce diffusa da una particella sferica

Focalizziamo l'attenzione sugli OPC progettati in base al fenomeno della diffusione della luce per misurare la dimensione delle particelle. In questo paragrafo analizzeremo il fenomeno della diffusione della luce in funzione della dimensione della particella.

Per una comprensione qualitativa del fenomeno fisico, della dispersione della radiazione elettromagnetica incidente su una singola particella, consideriamo un sistema costituito da una particella di piccole dimensioni suddivisa in n regioni infinitesime investite da un campo elettromagnetico come mostrato in figura 2.5 (F. Bohren, D.R. Huffman :Absorption and scattering of light by small particles).

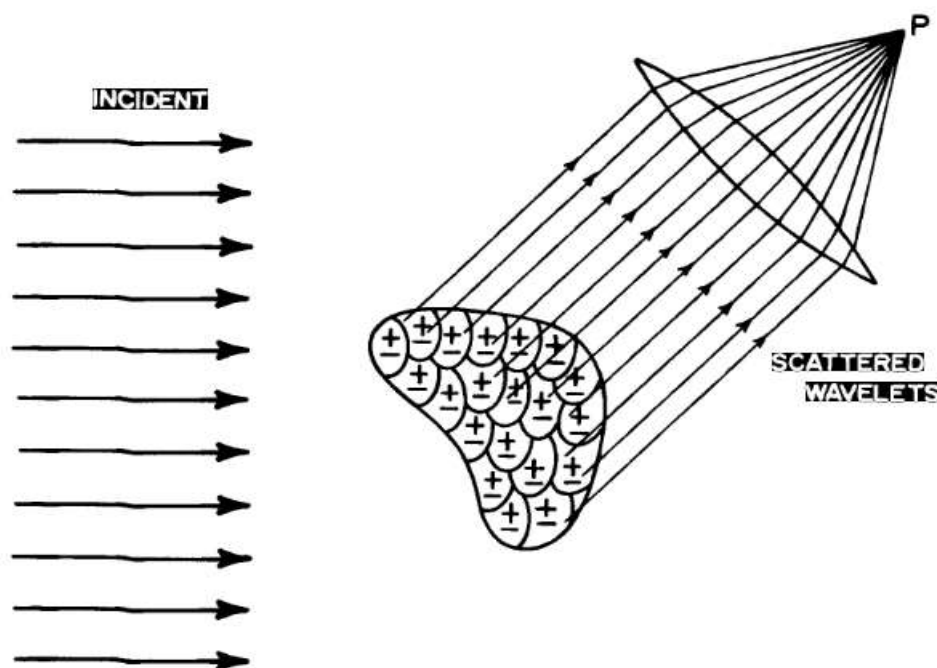


Figura 2.5: Luce totale diffusa dalle singole regioni misurata nel punto P

Un campo elettromagnetico incidente su una particella induce un momento di dipolo in ogni regione. Questi dipoli oscillano alla frequenza del campo applicato e quindi diffondono radiazione secondaria in tutte le direzioni.

In una particolare direzione rispetto a quella della radiazione incidente (ad un certo angolo θ in un punto distante P), il campo diffuso totale è ottenuto dalla sovrapposizione delle singole radiazioni di dipolo.

Nel sommare le radiazioni di dipolo si deve tener conto delle loro differenze di fase. La radiazione dei dipoli è coerente. In generale, queste relazioni di fase cambiano per diverse direzioni di diffusione e quindi per diversi angoli θ . Di conseguenza il campo diffuso varia a seconda della direzione di diffusione.

Se la dimensione della particella è minore della lunghezza d'onda della radiazione incidente, le radiazioni di dipolo sono per lo più in fase; per tali particelle l'intensità della luce diffusa varia di poco rispetto alla direzione di diffusione.

Nel caso in cui il diametro della particella sia molto minore della lunghezza d'onda della radiazione incidente, si considera la particella immersa in un campo uniforme come mostrato in figura 2.6; per cui la radiazione di dipolo emessa è coerente. Variando l'angolo di osservazione θ , la radiazione diffusa sarà pressappoco la stessa.

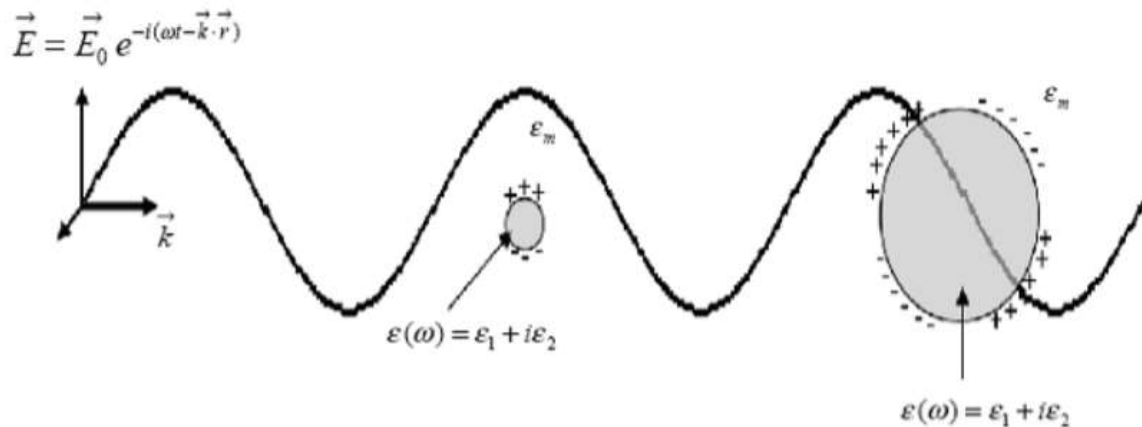


Figura 2.6: Interazione tra la radiazione incidente e particelle di diversa dimensione.

In figura 2.7 è mostrato il risultato di una simulazione ottenuta per una particella sferica fissando la lunghezza d'onda a 850 nm, il diametro della particella a 0.1 μm , l'indice di rifrazione a 1.5, in modo da notare la variazione dell'intensità della radiazione di dipolo (coerente nel caso $d \ll \lambda$) in funzione dell'angolo θ . Dal risultato della simulazione si evince che la radiazione di dipolo diffusa, subisce variazioni trascurabili in funzione dell'angolo θ . L'opposto accade nel caso $d \gg \lambda$.

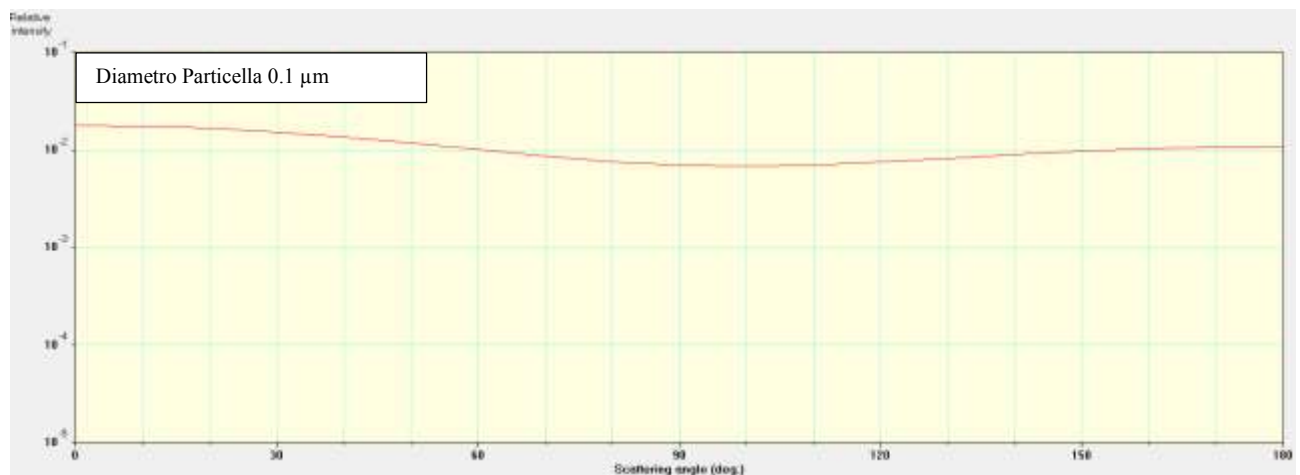


Figura 2.7: Intensità della radiazione diffusa da una particella sferica in funzione dell'angolo θ . λ : 850 nm; d : 0.1 μm ; m : 1.5.

Se la dimensione delle particelle aumenta rispetto alla lunghezza d'onda della radiazione incidente (Figura 2.8), si ottengono radiazioni di dipolo sia in fase che non in fase, perché l'onda elettromagnetica ecciterà solo alcune regioni delle particelle, con conseguente aumento dell'ampiezza o cancellazione delle radiazioni di dipolo. Per cui ciò che si osserva sperimentalmente è una serie di picchi e valli dovute proprio alla somma o alla cancellazione delle radiazioni di dipolo. In figura 2.8

è possibile notare che la radiazione di dipolo diffusa in funzione di θ subisce variazioni anche dell'ordine di 10^4 .

Maggiore è la dimensione della particella, maggiore sarà il numero di picchi e valli presenti nel pattern della radiazione diffusa. Anche la forma è importante: se la particella in figura 2.5 è irregolare, tutte le relazioni di fase saranno diverse.

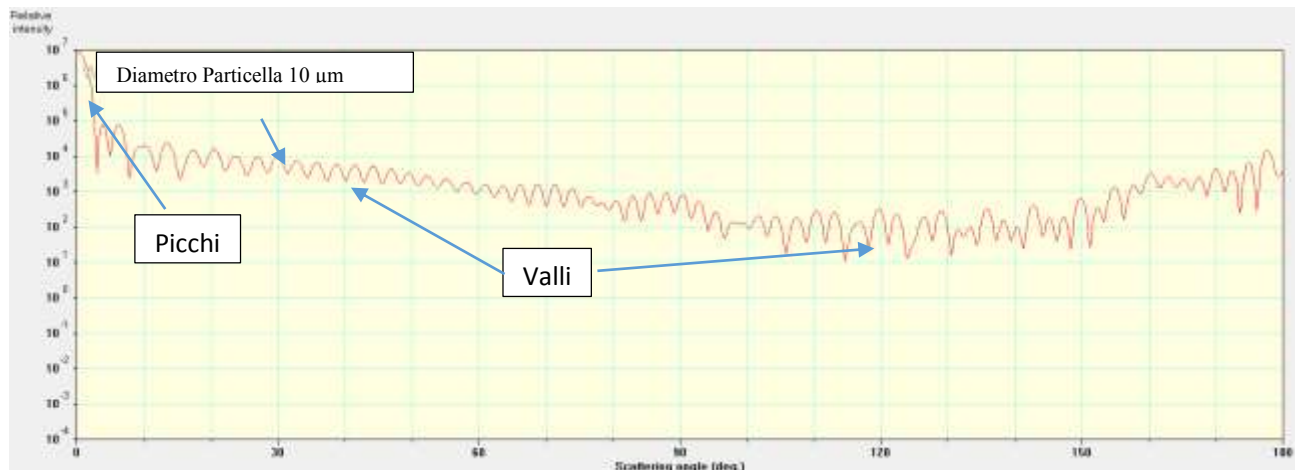


Figura 2.8: Intensità della radiazione diffusa da una particella sferica in funzione dell'angolo θ . λ : 850 nm; d : 10 μm ; m : 1.5

Le relazioni di fase tra le radiazioni di dipolo dipendono dalla direzione della luce diffusa e dalla forma e dimensione delle particelle. La fase e l'ampiezza della radiazione di dipolo ad una data frequenza dipende invece dal materiale di cui la particella è composta.

Forniamo ora una descrizione dettagliata del fenomeno di diffusione di una sorgente da parte di particelle sferiche.

Consideriamo una particella sferica di diametro d , indice di rifrazione m e situata nell'origine di un sistema di coordinate sferiche come in figura 2.9, illuminata dalla direzione $-z$ da un'onda piana, monocromatica e polarizzata linearmente con vettore elettrico nella direzione x .

La distribuzione spaziale della luce diffusa dalla particella per unità di angolo solido può essere descritta da una funzione i detta funzione di diffusione (scattering), che dipende dall'angolo di scattering θ , dalla lunghezza d'onda della luce λ , dall'angolo di polarizzazione della luce φ , dal diametro d della particella e dal suo indice di rifrazione m (P. Kulkarni, P.A. Baron, K. Willeke 2011).

$$i = i(\theta, \lambda, \varphi, d, m) \quad (2.1)$$

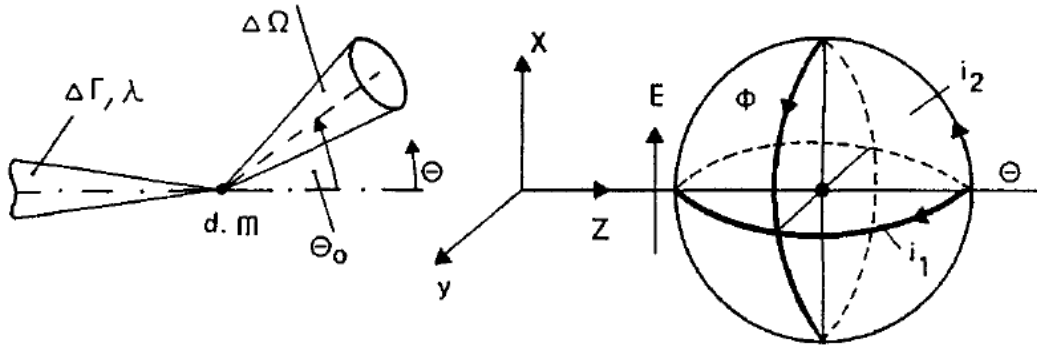


FIGURA 2.9: PARAMETRI SPAZIALI PER IL CALCOLO DELLA DISTRIBUZIONE DELLA LUCE DIFFUSA

Introduciamo il parametro α che esprime il rapporto tra λ e d nella forma:

$$\alpha = \pi \frac{d}{\lambda} \quad (2.2)$$

Esso viene chiamato parametro dimensionale.

La potenza della radiazione diffusa dalla particella per unità di angolo solido in direzione θ è data da:

$$S(\theta, \lambda, \varphi, d, m) = I_0 \frac{\lambda^2}{4\pi^2} i(\theta, \varphi, \alpha, m) \quad (2.3)$$

con I_0 che indica l'intensità della radiazione incidente (potenza della radiazione per unità di area).

La potenza della radiazione diffusa raccolta da un determinato sistema ottico entro un angolo solido $\Delta\Omega$, la si ottiene integrando l'equazione 2.3 in $d\theta$ e $d\varphi$:

$$P_\lambda(\theta, \varphi, d, \lambda, m) = I_0 \frac{\lambda^2}{4\pi^2} \iint_{\Delta\Omega} i(\theta, \alpha, \varphi, m) \sin(\theta) d\theta d\varphi \quad (2.4)$$

Per la dipendenza della radiazione diffusa i dall'angolo di polarizzazione φ si ha: $i = i_1 \sin^2(\varphi) + i_2 \cos^2(\varphi)$, dove $i_1(\theta, \alpha, m)$ e $i_2(\theta, \alpha, m)$ sono le due componenti della funzione di scattering rispettivamente nel piano perpendicolare e parallelo al vettore di polarizzazione \vec{E} della radiazione incidente.

L'espressione di i nel caso di radiazione non polarizzata è $i = (i_1 + i_2)/2$. Introduciamo quindi la quantità Q_s , che indica l'efficienza di diffusione. Q_s esprime il rapporto tra la sezione d'urto di diffusione dell'onda incidente sulla particella e la sezione d'urto geometrica della particella ortogonale alla direzione di incidenza della radiazione (quindi πr^2 nel caso di particella sferica):

$$Q_s = \frac{S_\lambda}{I_0 (\frac{\pi}{4}) d^2} \quad (2.5)$$

Nell'espressione di Q_s è assente il parametro I_0 , per cui la radiazione di dipolo diffusa, dipende solo dalle caratteristiche fisiche della particella e dalla lunghezza d'onda della radiazione incidente.

Nel caso in cui la dimensione della particella sia molto minore della lunghezza d'onda della radiazione incidente ($\alpha \ll 1$), S_λ assume la forma:

$$S_\lambda = I_0 \frac{\lambda^2}{8\pi^2} [\pi d / \lambda]^6 \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 (1 + \cos^2 \theta) \quad (2.6)$$

Dall'equazione 2.6, valida per radiazione non polarizzata, si evince che per particelle immerse in un campo elettromagnetico uniforme la distribuzione angolare della radiazione di dipolo diffusa dipende dal fattore $1 + \cos^2\theta$ che è un coefficiente simmetrico rispetto al piano normale alla direzione della luce incidente, per cui l'intensità di radiazione diffusa è uguale sia a 0° che a 180° come mostrato in figura 2.7.

Nel caso in cui $d \gg \lambda$ non è possibile considerare la particella immersa in un campo elettromagnetico uniforme e la diffusione della radiazione di dipolo assumerà la forma di figura 2.8. Nel calcolo del coefficiente di diffusione si dovrà tener conto dei processi di diffrazione, riflessione e rifrazione. Ridefiniamo la quantità Q_s come la somma dei contributi derivanti dai tre processi:

$$Q_s(\theta, \alpha, m) = Q_0(\theta, \alpha) + Q_1(\theta, m) + Q_2(\theta, m)$$

Q_0 rappresenta la luce diffusa per diffrazione ed essa è indipendente dalle proprietà ottiche della particella e dipende esclusivamente dal parametro dimensionale α .

Il termine Q_1 invece è la frazione di luce diffusa per riflessione dalla superficie della particella.

La distribuzione angolare in questo caso è indipendente dalla dimensione ed è legata strettamente alle proprietà ottiche della particella. Q_2 rappresenta la luce diffusa per rifrazione e come per Q_1 , la distribuzione angolare della luce diffusa dipende solo dalle proprietà ottiche.

Per ottenere un'espressione rigorosa di Q_s bisogna ricorrere alla soluzione esatta fornita dal fisico tedesco Gustav Mie.

2.4 Teoria di Mie

La diffusione di **Mie**, nota anche come **diffusione di Lorenz-Mie**, è una soluzione completa e matematicamente rigorosa del problema della diffusione di un'onda elettromagnetica incidente su una particella di forma sferica o cilindrica. La teoria che descrive l'interazione tra una radiazione incidente ed una particella prende il nome dal fisico tedesco Gustav Mie che nel 1908 pubblicò per primo la soluzione completa. Consideriamo un'onda elettromagnetica piana incidente su una particella sferica come mostrato in figura 2.10.

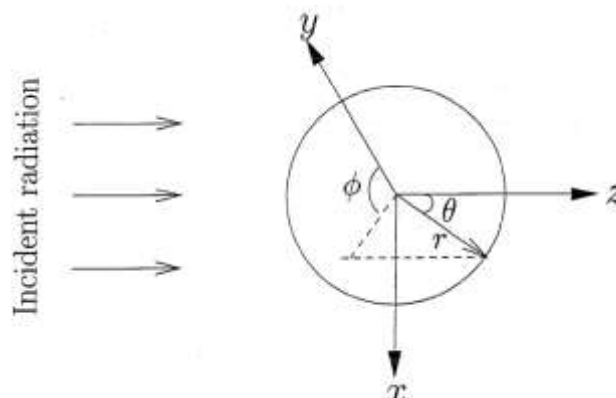


FIGURA 2.10: INTERAZIONE ONDA- PARTICELLA

L'onda elettromagnetica investe la particella eccitando le cariche superficiali della sfera che iniziano ad oscillare dando luogo ad un'emissione secondaria conosciuta come diffusione. Non tutta la radiazione incidente è diffusa, parte di essa è assorbita dalla particella. La caratteristica fisica, dal quale dipende l'assorbimento della radiazione incidente è la parte immaginaria dell'indice di rifrazione ik .

L'onda elettromagnetica incidente è costituita da un campo elettrico \vec{E} ed un campo magnetico \vec{B} . Ricavare una soluzione esatta della diffusione implica trovare l'espressione del campo elettrico e magnetico diffuso dalla particella come mostrato in figura 2.11.

La soluzione deve essere ricercata partendo dalle equazioni di Maxwell. Riportiamo le quattro equazioni di Maxwell:

$$\begin{aligned} 1) \nabla \cdot \vec{E} &= 4\pi\rho \\ 2) \nabla \cdot \vec{B} &= 0 \\ 3) \nabla \times \vec{E} + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} &= 0 \\ 4) \nabla \times \vec{B} + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} &= \frac{4\pi}{c} \vec{j} \end{aligned} \quad (2.7)$$

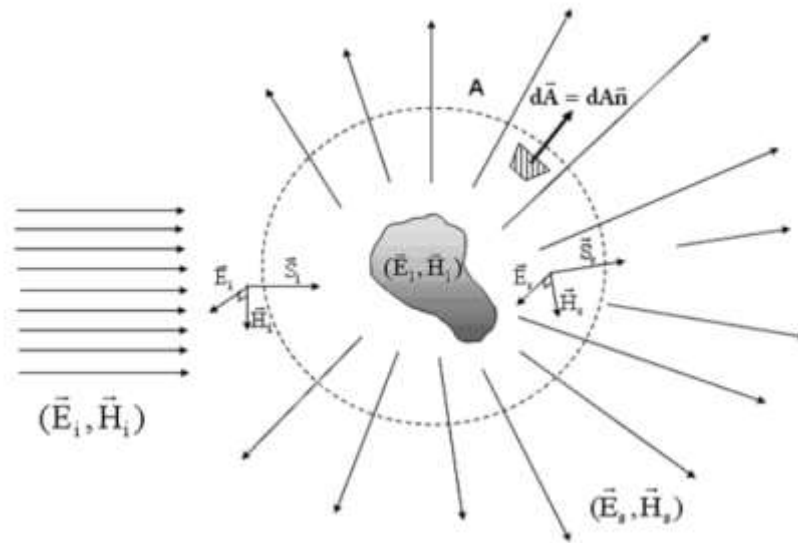


Figura 2.11: una particella, illuminata da un campo incidente $(E_i; H_i)$, emette un campo diffuso $(E_s; H_s)$

Dalle equazioni 2.7 si ricava l'equazione delle onde per i campi monocromatici incidenti \mathbf{E} e \mathbf{B} . Le equazioni assumono la forma :

$$\nabla^2 \mathbf{E} + n^2 k^2 \mathbf{E} = 0 \quad ; \quad \nabla^2 \mathbf{B} + n^2 k^2 \mathbf{B} = 0 \quad (2.8)$$

dove k è il vettore d'onda nel vuoto ed n l'indice di rifrazione del mezzo in cui è immersa la particella. Sotto determinate condizioni al contorno $\nabla E = \nabla B = 0$ e considerando che il sistema ha simmetria sferica, conviene risolvere il problema in coordinate sferiche. Sfruttando il principio di sovrapposizione delle onde sferiche, le quali costituiscono un insieme di funzioni complete ed ortonormali, possiamo sviluppare una funzione come somma di onde sferiche.

L'idea di base alla teoria di Mie è di riscrivere l'onda piana incidente come sovrapposizione di onde sferiche (tramite uno sviluppo in serie) dentro e fuori la sfera ed imporre le condizioni al contorno sulla superficie per ottenere i coefficienti dello sviluppo.

Alla luce di ciò possiamo scrivere la funzione del campo elettrico diffuso come la somma di onde sferiche; quindi ciò che otteniamo è:

$$E_s = E_0 \frac{e^{(ikr-wt)}}{-ikr} \sum_{l=1}^{\infty} \left[\frac{2l+1}{l(l+1)} \right] \left[a_l \frac{P_l^j}{\sin\theta} \cos\theta + b_l \frac{dP_l^j}{d\theta} \cos\theta \right] \quad (2.9)$$

P_l^j sono i polinomi di Legendre e a_l e b_l sono i coefficienti di diffusione. I coefficienti di diffusione si scrivono:

$$a_l = \frac{\psi_l'(m\alpha)\psi_l(\alpha) - m\psi_l(m\alpha)\psi_l'(\alpha)}{\psi_l'(m\alpha)\zeta_l(\alpha) - m\psi_l(m\alpha)\zeta_l'(\alpha)} \quad (2.10)$$

$$b_l = \frac{m\psi_l'(m\alpha)\psi_l(\alpha) - \psi_l(m\alpha)\psi_l'(\alpha)}{m\psi_l'(m\alpha)\zeta_l(\alpha) - \psi_l(m\alpha)\zeta_l'(\alpha)}$$

con ψ e ζ che rappresentano le funzioni di Riccati-Bessel.

Una volta noti i coefficienti di scattering è possibile calcolare la sezione d'urto del processo:

$$\sigma = \frac{2\pi}{k^2} \sum_{l=1}^{\infty} (2l+1) (|a_l|^2 + |b_l|^2) \quad (2.11)$$

Ricavata la sezione d'urto siamo in grado di fornire l'espressione di Q_s in funzione di α :

$$Q_s(\theta, \alpha, m) = \frac{2}{\alpha^2} \sum_{l=1}^{\infty} (2l+1) (|a_l|^2 + |b_l|^2) \quad (2.12)$$

L'espressione di Q_s è stata utilizzata per eseguire simulazioni teoriche i cui risultati saranno mostrati nei paragrafi successivi.

2.5 Applicazioni degli OPC

Studiare le polveri in sospensione nell'atmosfera terrestre nel corso degli anni ha acquistato grande importanza in special modo quando si è dimostrato che la presenza di polveri in atmosfera incide sullo stato di salute della popolazione e sulle caratteristiche ambientali dell'intero pianeta.

Gli OPC vengono utilizzati nelle grandi città per misurare le concentrazioni delle polveri sottili e la loro dimensione, generate dall'inquinamento, ed immesse in atmosfera.

A seconda della loro dimensione, le polveri possono avere effetti diversi e dannosi sull'uomo e sull'ambiente. La presenza di polveri sospese in atmosfera è da attribuirsi ad eventi naturali e fattori antropici.

Eventi naturali:

- Tempeste di sabbia.
- Incendi.
- Microrganismi trasportati dai venti.
- Trasporto di polline e spore.
- Erosione di rocce.

- Eruzioni vulcaniche.
- Polvere cosmica.

Tra i fattori antropici si include gran parte degli inquinanti atmosferici:

- Emissioni dei gas di combustione (automobili, aerei, fabbriche);
- Emissioni dovute al riscaldamento domestico (in particolare gasolio, carbone e legna);
- Residui dovuti all'usura del manto stradale, dei freni e delle gomme delle vetture;
- Emissioni dovute alle lavorazioni meccaniche, cementifici, cantieri;
- Lavorazioni agricole;
- Inceneritori e centrali elettriche;
- Fumo di tabacco.

Le particelle di polvere in sospensione nell'atmosfera sono state classificate in base alla dimensione, natura e processo di emissione come descritto nel seguito:

- Particelle liquide o solide sospese di diametro minore di 1 μm ; sono dispersioni di tipo colloidale, che causano, ad esempio, all'alba e al tramonto, l'effetto Tyndall, facendo virare il colore della luce solare verso l'arancione.
- Esalazioni: particelle solide di diametro $< 1 \mu\text{m}$, in genere prodotte da processi industriali.
- Foschie: goccioline di liquido di diametro $< 2 \mu\text{m}$.
- Fumi: particelle solide disperse di diametro $< 2 \mu\text{m}$, trasportate da prodotti della combustione.
- Polveri: particelle solide di diametro variabile tra 0,25 e 500 μm .
- Sabbie: particelle solide di diametro $> 500 \mu\text{m}$.

2.5.1 Effetti delle particelle sulla salute umana

Il particolato ha effetti diversi sulla salute umana ed animale a seconda dell'origine (naturale, antropica ecc.) e delle dimensioni delle polveri. In taluni casi (si pensi all'aerosol marino), l'effetto può addirittura essere benefico.

Tra i disturbi attribuiti al particolato fine e ultrafine (PM_{10} e soprattutto $\text{PM}_{2,5}$) vi sono patologie acute e croniche a carico dell'apparato respiratorio (asma, bronchiti, enfisema, allergia, tumori) e cardio-circolatorio (aggravamento dei sintomi cardiaci nei soggetti predisposti).

Il meccanismo preciso con cui il particolato interferisce con gli organismi non è ancora completamente chiaro: è noto che al diminuire delle dimensioni la possibilità di interazione biologica aumenta, in quanto le particelle più piccole possono raggiungere laringe, trachea, polmoni e alveoli, e qui rilasciare parte delle sostanze inquinanti che trasporta (ad esempio idrocarburi policiclici aromatici, SO_x e NO_x).

Le cosiddette nanopolveri arriverebbero addirittura a penetrare nelle cellule, rilasciando direttamente le sostanze trasportate, con evidente maggior pericolo. Secondo alcuni, queste sarebbero pertanto responsabili di patologie specifiche (studiate nell'ambito della nanotossicologia), ma finora gli studi (oggi ancora ad uno stadio iniziale, e legati non solo allo studio delle polveri disperse in aerosol ma in generale alle nanotecnologie) non hanno portato ad alcuna prova epidemiologica definitiva.

Secondo lo SCENHIR attualmente "gli studi epidemiologici riguardo l'inquinamento atmosferico non forniscono evidenze che le nanoparticelle siano più dannose di particolato di maggiori dimensioni".

2.5.2 Effetti delle particelle sull'ambiente e sulla meteorologia

Il pulviscolo ha effetti nella propagazione e nell'assorbimento delle radiazioni solari, sulla visibilità atmosferica e nei processi di condensazione del vapore acqueo (favorendo smog e nebbie).

L'aumento dell'inquinamento ha causato negli ultimi anni la formazione di un fenomeno noto come oscuramento globale, che consiste in una graduale riduzione dell'intensità dell'irraggiamento diretto sulla superficie terrestre (a causa della maggior diffusione della luce dovuta ad una maggior quantità di aerosol atmosferico), risultante in un lieve raffreddamento della superficie terrestre.

Tale fenomeno, che varia a seconda delle aree coinvolte, è stato osservato a partire dagli anni cinquanta ed ha fino ad ora compensato (e dunque attenuato) parzialmente gli effetti del riscaldamento globale, in termini difficilmente quantificabili. La diminuzione dell'emissione di particolato in atmosfera in aree come l'Europa sta riducendo tale fenomeno.

3. MicroMED (*Micro MEDUSA*): un OPC per l'ambiente marziano

Gli OPC forniscono una misura diretta della dimensione delle polveri e della loro concentrazione in atmosfera ed in taluni casi ne misurano anche le caratteristiche ottiche risalendo alla loro composizione chimica e strutturale. L'uso degli OPC è divenuto indispensabile sia per monitorare il tasso d'inquinamento, che per valutare l'incidenza delle polveri atmosferiche nell'evoluzione morfologica e ambientale della Terra.

Considerazioni analoghe, trascurando i fattori dell'inquinamento, possono essere fatte anche per il pianeta Marte. Nel capitolo 1 abbiamo descritto i fenomeni correlati alla presenza delle polveri in sospensione nell'atmosfera marziana e le relative conseguenze sull'ambiente e sul clima. Infatti su Marte come sulla Terra la presenza delle particelle incide sulle condizioni climatiche e sull'evoluzione morfologica del pianeta.

Per lo studio delle polveri in sospensione su Marte non è stato mai realizzato un OPC capace di funzionare nelle condizioni Marziane. Per cui il lavoro di dottorato ha avuto come obiettivo la realizzazione dell'**OPC Marziano**. Esso sfrutta il principio della diffusione della luce ed è costituito da un sistema di flussaggio, sensori e sorgente di luce capaci di funzionare alle temperature e pressioni marziane.

MicroMED è un OPC realizzato per operare nelle condizioni atmosferiche di Marte. Esso è la versione miniaturizzata di un altro OPC realizzato all'Osservatorio Astronomico di Capodimonte chiamato *MEDUSA*. *MEDUSA*, non è stato mai operativo.

Il lavoro di dottorato ha riguardato la partecipazione alla progettazione, realizzazione e sviluppo, del rivelatore di polvere MicroMED e la messa a punto e realizzazione di un set-up sperimentale (hardware e software) per la verifica e la calibrazione del prototipo realizzato. Il lavoro di dottorato è stato suddiviso in realizzazione, sviluppo e test eseguiti presso l'Osservatorio Astronomico di Capodimonte e progettazione e sviluppo del sistema di acquisizione dati effettuato presso l'azienda Techno System di Pozzuoli (NA).

MicroMED è un rivelatore avente dimensioni $40 \times 36 \times 43 \text{ mm}^3$ e peso di circa 500 grammi. Il consumo energetico è di 1.6 watt. Quindi è uno strumento piccolo, leggero e con consumi sufficientemente ridotti per essere incluso nell'equipaggiamento di una missione spaziale. Come già accennato MicroMED è il frutto della miniaturizzazione dello strumento *MEDUSA*, realizzato per il primo lander previsto per la missione ExoMars e mai realizzato.

MEDUSA (acronimo di Martian Environment Dust Systematic Analyzer), è stato realizzato per misurare in situ la distribuzione dimensionale e la concentrazione della polvere, la sua carica elettrica e velocità oltre all'abbondanza del vapore acqueo nell'atmosfera marziana a livello del suolo.

Lo strumento *MEDUSA* è stato progettato dal Laboratorio di Fisica Cosmica e Planetologia dell'INAF - Osservatorio Astronomico di Capodimonte, Napoli, Italia, e il suo sviluppo fu finanziato dalla European Space Agency (ESA) e Agenzia Spaziale Italiana (ASI) per le diverse fasi del progetto.

MEDUSA inizialmente fu concepito per essere ospitato nel Pasteur Payload (PPL) sul Rover ExoMars; poi fu trasferito nel Humboldt Payload (HPL) sul lander ExoMars successivamente cancellato. Nel 2009, lo strumento *MEDUSA* superò con successo la Preliminary Design Review

ESA (PDR) con un livello tecnologico raggiunto (TRL) pari a 5.3 (Colangeli, L; Lopez-Moreno, JJ; Nornberg, P; Della Corte, V; Esposito, F; Epifani, EM; Merrison, J; Molfese, C; Palumbo, P; Rodriguez-Gomez, JF; Rotundi, A; Visconti, G; Zarnecki, JC, 2009, PLANETARY AND SPACE SCIENCE).

3.1 Obiettivi Scientifici di MEDUSA

Le informazioni che possono essere ricavate dalle misure acquisibili in situ da MEDUSA su diversi intervalli di tempo (giorni, stagioni, anni) costituiscono input importanti in diverse aree di interesse: per lo studio scientifico di Marte:

- per determinare le attuali condizioni climatiche di Marte;
- per derivare informazioni sulle condizioni climatiche presenti nel passato.
- per verificare la presenza di acqua;
- per determinare i parametri fisici che incidono sulla presenza di forme di vita su Marte;
- per validare dalla superficie i dati acquisiti dagli orbiter;

nella programmazione delle operazioni su Marte:

- per valutare le condizioni di rischio associate all'ambiente marziano;
- per porre vincoli sulle condizioni operative sulla superficie di Marte;
- per supportare la definizione delle missioni future su Marte.

MEDUSA può contribuire a questi obiettivi generali eseguendo in situ misure per determinare l'abbondanza e la distribuzione dimensionale della polvere, le proprietà elettriche relative e l'abbondanza di vapore acqueo, che sono principalmente interessanti per affinare la conoscenza del ciclo della polvere e i modelli climatici.

- *Distribuzione dimensionale della polvere*

MEDUSA può misurare particelle nell'intervallo dimensionale 0.05-20 μm . La misura nell'intervallo 0.4-20 micron si ottiene mediante un'analisi della luce diffusa dai grani, mentre la misura nell'intervallo 0.05 – 0.4 micron si ottiene tramite l'utilizzo di una microbilancia.

- *Abbondanza della polvere*

La densità della polvere ovvero il numero di particelle per unità di volume di fluido aspirato dalla pompa si ottiene considerando il numero di particelle passanti attraverso il volume di campionamento di cui sono note le dimensioni.

- *Abbondanza del Vapore Acqueo presente in atmosfera*

L'abbondanza del vapore acqueo viene misurata a partire dalla sua pressione parziale, ottenuta misurando la temperatura di condensazione del vapore sulla superficie di un dispositivo controllato termicamente, cioè un microbilancia.

- *Carica elettrica delle particelle di polvere in sospensione*

Viene misurata nell'intervallo $\pm 10^3$ - 10^6 elettroni / grano applicando campi elettrici ad una superficie su cui si accumula la polvere.

3.2 Il rivelatore MEDUSA

Il sistema MEDUSA (Fig. 3.1) è composto dai seguenti sottosistemi: un corpo principale per la misura dell'abbondanza e granulometria delle polveri, una microbilancia per la misura dell'abbondanza del vapore acqueo, un dispositivo per la misura delle proprietà elettriche della polvere, l'elettronica principale dello strumento. Il peso complessivo è di circa 2,4 Kg e il consumo energetico è pari a 22 Watt.

Il Corpo principale di MEDUSA include i seguenti componenti:

- Testa di Campionamento
- Sistema Ottico
- Microbilancia per la misura cumulativa delle polveri sottili
- Pompa
- Elettronica di prossimità

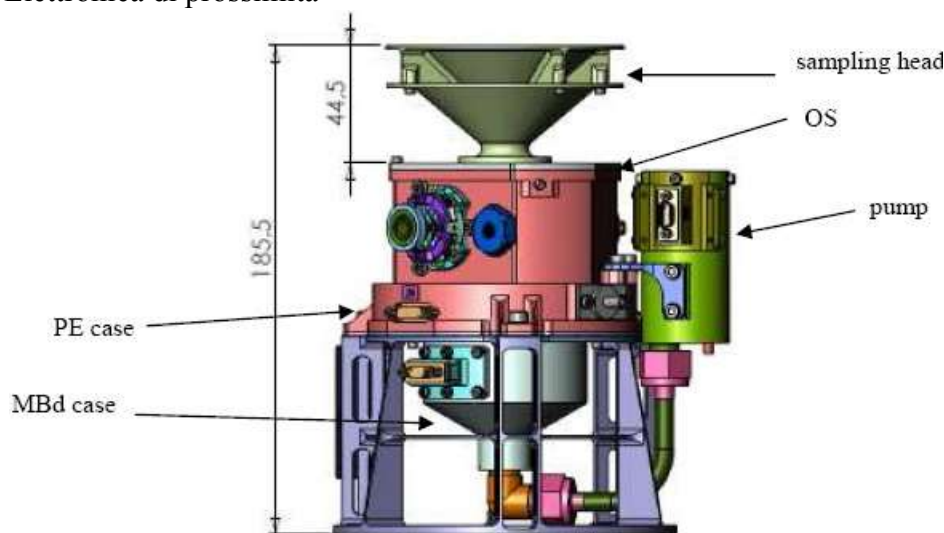


Figura 3.1: MEDUSA

3.2.1 Sistema ottico (OS)

Il sistema ottico (*OS*) è rappresentato in figura 3.2 ed è costituito da: un laser, un obiettivo anamorfico, due specchi, il volume di campionamento (SV), una trappola di luce e due fotorivelatori. E' racchiuso in una struttura cilindrica di dimensioni 130 mm (diametro) x 52 mm (altezza).

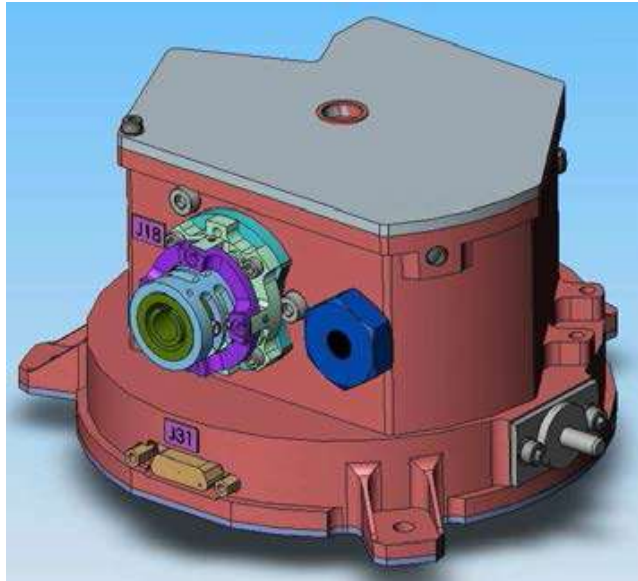


Figura 3.2: MEDUSA Optical Stage.

Nel sistema ottico la sorgente di luce è costituita da un diodo laser di potenza ottica 1 Watt e lunghezza d'onda di 808 nm. Il volume di campionamento è stato realizzato utilizzando un obiettivo anamorfico e una fibra ottica. La dimensione del volume di campionamento è di $3 \times 1.2 \times 0.32 \text{ mm}^3$.

Considerando la potenza ottica di 1 Watt e le dimensioni del volume di campionamento pari a $3 \times 0.1 \times 0.3 \text{ mm}^3$, il diametro delle particelle che il sistema ottico di MEDUSA è capace di rivelare è compreso tra 0.4 e 20 μm .

In Figura 3.3 è mostrata la sezione del sistema ottico.

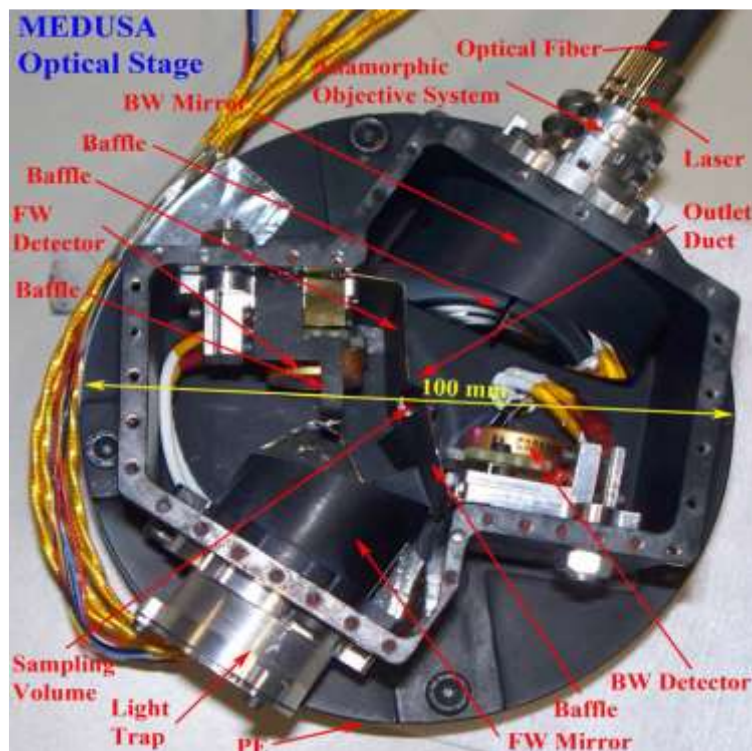


Figura 3.3: Sezione del Sistema ottico (OS).

In figura 3.3 la direzione delle particelle aspirate dalla pompa è perpendicolare all'immagine. L'obiettivo anamorfico, rappresentato in figura 3.4, focalizza la luce proveniente da una fibra ottica e genera il volume di campionamento.

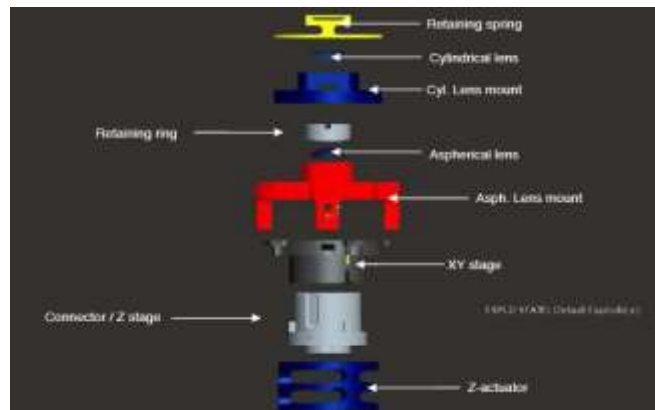


Figura 3.4: Obiettivo Anamorfico.

E' composto da una lente collimatrice asferica e una lente cilindrica per fornire la forma del fascio laser richiesta per il volume di campionamento.

In realtà, le lenti anamorfiche distorcono otticamente le immagini e correggono la naturale divergenza del fascio laser focalizzando la luce in un punto. La luce diffusa dalle particelle viene raccolta da due specchi e convogliata sui due fotodiodi. Nell'immagine 3.3 sono presenti anche dei baffles (diaframmi). Essi sono stati usati per impedire che parte del fascio riflettesse in maniera casuale all'interno del sistema ottico generando stray-light.

MEDUSA è uno strumento capace di fornire varie e importanti informazioni. Al fine di renderlo più competitivo per un possibile utilizzo sulle missioni spaziali future, è stato effettuato un ridimensionamento in termini di dimensione, massa e potenza assorbita cercando al contempo di mantenerne le peculiarità.

Il ridimensionamento ha dato vita ad un nuovo strumento, **MicroMED** ovvero **Micro MEDUSA**.

3.3 MicroMED

Il ridimensionamento di MEDUSA ha portato alla luce un nuovo sensore che pur mantenendo le stesse caratteristiche di quello precedente, possiede delle dimensioni nettamente inferiori ma soprattutto un peso di circa 1/4 di MEDUSA e un consumo energetico di circa 1/20. In figura 3.5 sono mostrati i sensori a confronto.



(a)



(b)

Figura 3.5: (a) MEDUSA ; (b) MicroMED

In tabella 3.1 sono riportate le caratteristiche di MEDUSA e MicroMED.

Tabella 3.1: Confronto tra le caratteristiche degli strumenti MEDUSA e MicroMED

	MEDUSA	MicroMED
Dimensioni	Diametro 130 mm x Altezza 300 mm	43 x 40 x 36 mm ³
Massa totale	2243 g	500 g (senza elettronica principale) (TBC)
Massima potenza assorbita	21.44 W	1.6 W (solo elettronica di prossimità)
Testa di campionamento	Ugello	Piccolo tubo
Apertura degli specchi	±33° nella direzione FW ±47° nella direzione BW	±65° a 90°
Volume di campionamento	1.2 mm x 0.32 mm x 3 mm	1 mm x 1 mm x 0.08 mm
Rivelatori	Area sensibile: 50 mm ² Responsività: 0.5 A/W	Area sensibile: 50 mm ² Responsività: 0.5 A/W
Diodo Laser	Lunghezza d'onda: 808 nm Potenza ottica: 1000 mW	Lunghezza d'onda: 850 nm Potenza ottica: 100 mW
Pompa	Portata massima: 5.5 l/min	Portata massima : 1.0 l/min
Microbilancia per la polvere	Sensibilità in massa: $5.09 \cdot 10^8$ Hz/g/cm ²	N/A
Microbilancia per il vapor d'acqua	Sensibilità in massa : $2.47 \cdot 10^9$ Hz/g/cm ²	N/A
Elettronica di prossimità	4 Canali (2 per la diffusione in FW + 2 per la diffusione in BW)	1 Canale con 2 uscite: Basso guadagno 10^5 , alto guadagno 10^7

Le differenze tra i due sensori sono notevoli pur avendo le stesse prestazioni. Entrambi misurano la dimensione delle particelle nel range di 0.4 – 20 µm.

MicroMED è un sensore di forma parallelepipedica di dimensioni 40 x 43 x 36 mm³ come mostrato in figura 3.7. Esso presenta un inlet ed un outlet ovvero due condotti cilindrici che permettono il passaggio delle particelle canalizzandole nel volume di campionamento, una pompa per aspirare le particelle capace di lavorare a pressioni marziane, un sistema ottico costituito da un sistema di lenti,

uno specchio per raccogliere la luce diffusa dalle particelle e una trappola di luce, una sorgente laser, un sensore fotorivelatore e un'elettronica di prossimità.

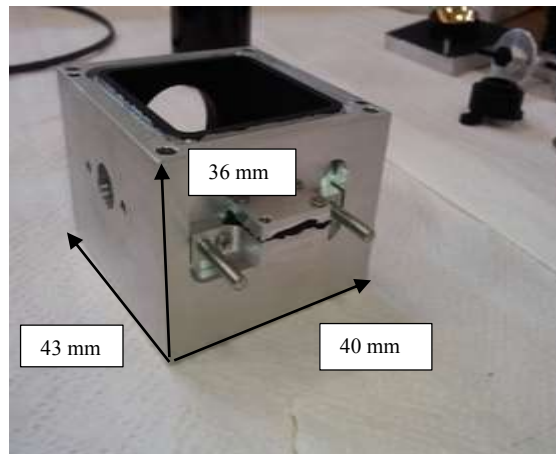


Figura 3.7: Dimensioni esterne di MicroMED

Il principio di funzionamento di MicroMED è il seguente: la pompa aspira un fluido costituito da particelle e aria attraverso la testa di campionamento dell'inlet esterno. L'inlet poi focalizza il flusso di particelle nel volume di campionamento generato dal sistema ottico. Le particelle che attraversano il volume di campionamento vengono illuminate dal fascio prodotto dalla sorgente laser e diffondono la sua luce in tutte le direzioni. La luce diffusa è raccolta da uno specchio e coinvogliata sul fotodiodo, il quale per effetto fotoelettrico restituisce un segnale in corrente dipendente dalla dimensione, forma, composizione e velocità della particella. Il segnale è poi processato dall'elettronica di prossimità PE.

MicroMED è costituito dai seguenti sottosistemi:

- Testa di campionamento, inlet ed outlet
- Sistema Ottico
- Diodo laser
- Fotorivelatore
- Fibra ottica
- Elettronica di prossimità (PE)
- Pompa

Analizziamo in dettaglio i componenti che costituiscono MicroMED.

3.3.1 Testa di campionamento, inlet ed outlet

I condotti cilindrici inlet ed outlet con la testa di campionamento (fig.3.8) sono stati progettati per agevolare il passaggio delle particelle aspirate dalla pompa, ma in special modo hanno il compito di focalizzare le particelle nel volume di campionamento evitando turbolenze e moti vorticosi all'interno di MicroMED che sarebbero causa di due problemi. Il primo riguarda l'ambiguità dei segnali perché una stessa particella potrebbe attraversare più volte il volume di campionamento alterando la misura della distribuzione dimensionale. L'altro problema è il deposito delle particelle sugli elementi sensibili come specchio o rivelatore che può portare ad un degrado progressivo delle prestazioni dello strumento.

Simulazioni con il software *Fluent* di fluidodinamica computazionale hanno dimostrato che il sistema progettato non presenta moti vorticosi e turbolenze.

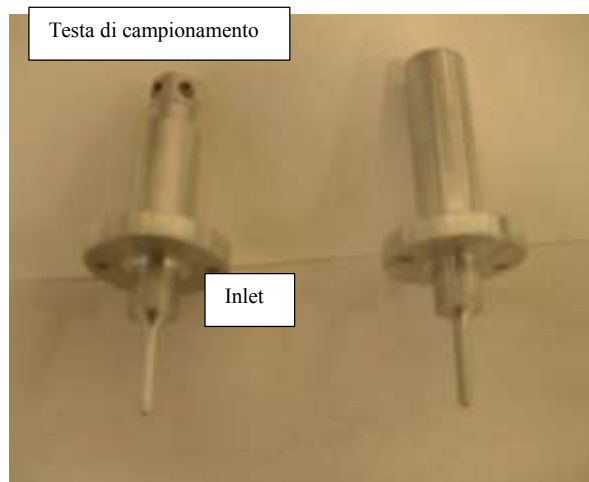


Figura 3.8: Inlet, outlet e testa di campionamento.

La testa di campionamento è un cilindro di 8 mm di diametro, la base superiore è chiusa, mentre lateralmente sono presenti quattro fori di diametro 4 mm da cui le particelle sono aspirate. La testa di campionamento inoltre impedisce il passaggio di particelle con diametro maggiore di 20 μm evitando l'ostruzione dei condotti. Le simulazioni effettuate con Fluent hanno evidenziato che le particelle con diametro maggiore di 20 μm urtano contro la parete interna dell'inlet non riuscendo così ad entrare nello strumento.

L'inlet è un condotto di 40 mm di lunghezza. Nei primi 22 mm presenta un diametro di 4 mm, poi il diametro diminuisce progressivamente terminando con un valore di 1 mm. La parte di condotto avente diametro 1 mm è situata all'interno di MicroMED. Lo stesso vale per l'outlet, che raccoglie il flusso in uscita dall'inlet e lo espelle all'esterno dello strumento. Inlet ed outlet distano 4 mm come mostrato in figura 3.9.

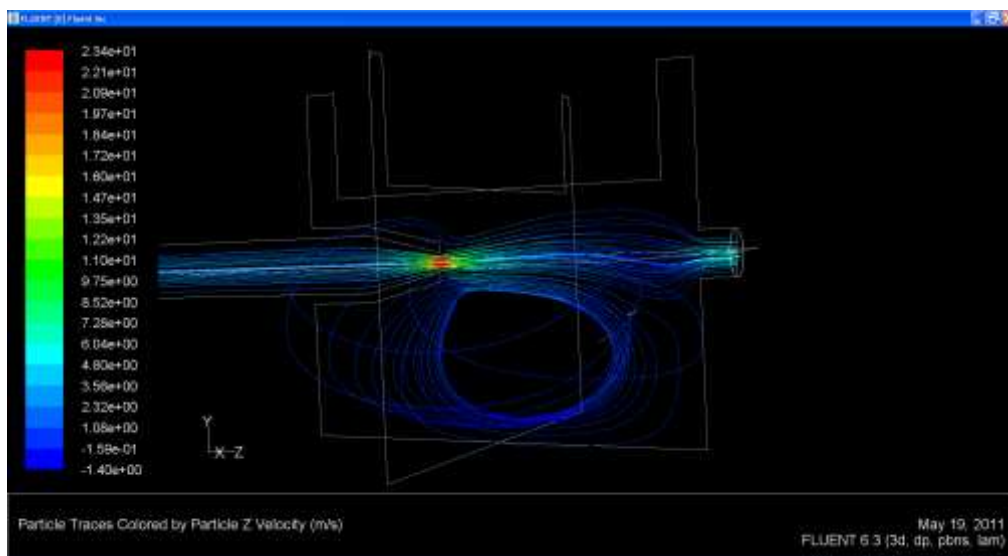


Figura 3.9: Distanza tra inlet ed outlet interni pari a 4mm

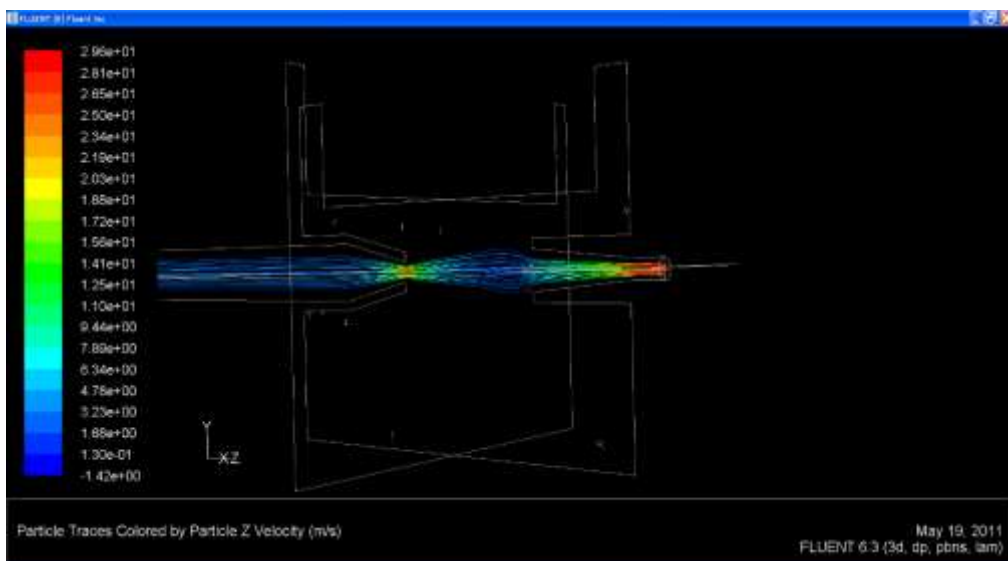
Come precedentemente si è accennato sono state effettuate varie simulazioni per dimensionare correttamente i condotti. In figura 3.10 sono mostrati due risultati delle simulazioni (Ventura, S. 2011). Nell'immagine 3.10 (a) è rappresentato il risultato di una simulazione eseguita considerando un flusso di particelle di diametro $0.2\ \mu\text{m}$ immerse in CO_2 , aspirato con una portata di 3 litri al minuto, alla temperatura di 300 K e pressione 600 Pa.

In questa simulazione l'outlet non presenta nessun condotto all'interno di MicroMED. Questa configurazione ha prodotto sia moti vorticosi che moti turbolenti.

Nel secondo risultato ottenuto con lo stesso flusso alle medesime condizioni di temperatura e pressione, l'outlet presenta un condotto all'interno di MicroMED. Come si evince dall'immagine non sono presenti moti turbolenti e vorticosi.



(a) CO_2 , $p = 600\ \text{Pa}$, $T = 300\ \text{K}$, $Q = 3\ \text{l/min}$, $d_p = 0.2\ \mu\text{m}$, MicroMED in assenza di outlet



(b) CO_2 , $p = 600\ \text{Pa}$, $T = 300\ \text{K}$, $Q = 3\ \text{l/min}$, $d_p = 0.2\ \mu\text{m}$, MicroMED con il condotto di outlet.

Figura 3.10: Risultati simulazioni fluidodinamiche di inlet ed outlet. (a): in assenza del condotto interno a MicroMED. (b): in presenza del condotto interno a MicroMED (Ventura, S. 2011).

Nella tabella 3.2 sono riassunte le caratteristiche di Inlet ed Outlet.

Condotto cilindrico	
Materiale	Lega di alluminio Al 6082-T6
Diametro interno del condotto	$4 \cdot 10^{-3}$ m
Diametro esterno del condotto	$6 \cdot 10^{-3}$ m
Diametro interno del condotto (all'interno della scatola del sistema ottico)	$1 \cdot 10^{-3}$ m
Diametro esterno del condotto (all'interno della scatola del sistema ottico)	$3 \cdot 10^{-3}$ m
Lunghezza	42 mm
Diametro testa di campionamento	10 mm
Diametro dei fori sulla testa di campionamento	4 mm

Tabella 3.2: Caratteristiche fisiche di Inlet ed Outlet di MicroMED

3.3.2 Sistema Ottico

Il Sistema Ottico di MicroMED è un insieme di elementi capace di creare all'interno del sensore una regione illuminata chiamata volume di campionamento (Figura 3.11). Ricordiamo che le particelle attraversando il volume di campionamento diffondono la luce, la quale è di seguito convogliata su un fotorigliatore.

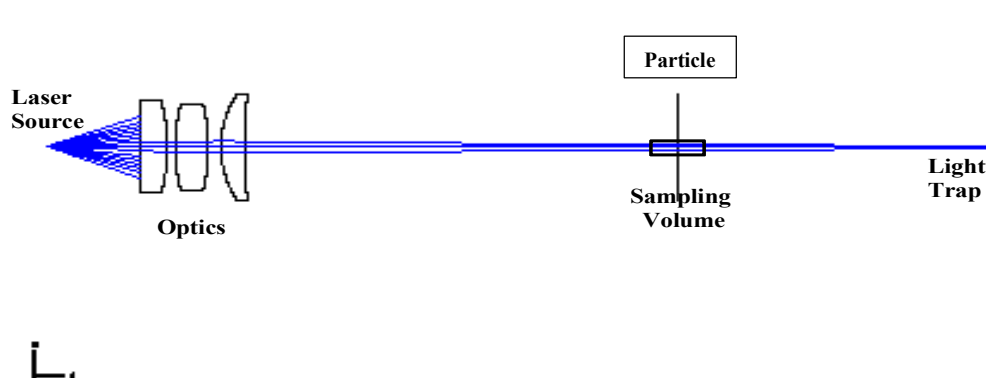


Figura 3.11: Schema concettuale del sistema ottico

Il sistema ottico è costituito da una sorgente di luce, rappresentata da un laser di potenza ottica pari a 100 mW e lunghezza d'onda di 850 nm, ed una serie di elementi ottici capaci di focalizzare la luce del laser nel punto desiderato e cioè al centro dell'area compresa tra inlet ed outlet, generando il volume di campionamento.

La serie di elementi ottici è formata da due sistemi di lenti collegati da una fibra ottica. Il primo sistema di lenti (figura 3.12) focalizza la luce proveniente dal laser nella fibra ottica. Esso è stato realizzato con lenti asferiche convesse.

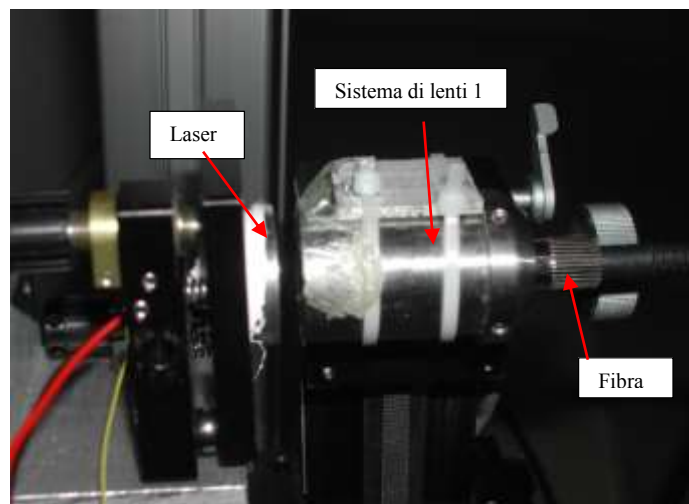


Figura 3.12: Primo sistema di lenti 1

La fibra ottica ha un core di 27 μm , un cladding di diametro 125 μm ed una apertura numerica NA pari a 0.41. La fibra è stata prodotta su richiesta specifica dall'azienda canadese OZ optics.

Il secondo sistema di lenti (figura 3.13) focalizza la luce uscente dalla fibra nel punto centrale tra inlet ed outlet generando il volume di campionamento. E' stato realizzato con una lente sferica ed una cilindrica.



Figura 3.13: Secondo sistema di lenti 2

Il sistema ottico è stato progettato e realizzato per generare un volume di campionamento di forma regolare e con un'alta densità energetica. MicroMED utilizza un laser con potenza ottica di 100 mW

e per ottenere le stesse prestazioni di MEDUSA, che utilizzava un laser con potenza ottica 1 Watt, è necessario che il sistema ottico concentri in un punto tutta o quasi la luce del laser.

Il sistema ottico è stato progettato in modo che, forma, dimensione e densità energetica del volume di campionamento fossero sufficienti per rivelare particelle di 0.2 μm di diametro. Nel capitolo 4 entreremo in dettaglio riguardo i risultati delle simulazioni.

3.3.3 Caratteristiche della sorgente Laser

La sorgente di luce è costituita da un diodo laser **FIDL-100S-850D-60** prodotto da Frankfurt Laser Company con sede in Germania. Le caratteristiche del diodo laser sono riassunte nella tabella 3.3.

Il Laser ha una lunghezza d'onda di 850 nm e potenza ottica di 100 mW.

Il laser è un elemento esterno al sistema ottico dello strumento ed è collegato ad esso attraverso una fibra ottica. Questo permette di poter alloggiare questo elemento, molto sensibile alla temperatura, in una regione del lander/rover che sia termicamente controllata (Warm Compartment). Quest'area viene generalmente predisposta nei lander/rover per alloggiare il sistema di controllo degli strumenti. Il corpo principale di MicroMED deve essere invece necessariamente alloggiato all'esterno, a contatto con l'ambiente marziano da campionare.

Diodo Laser	
Produttore	FLC - Frankfurt Laser Company
Modello	FIDL-100S-850D-60
Potenza Ottica	100 mW
Lunghezza d'onda	850 nm
Area Emettitrice	3 μm x 1.5 μm
Corrente di soglia	30 mA
Corrente diretta	170 mA
Tensione diretta	1.9 V
Divergenza fascio parallela	6°
Divergenza fascio Perpendicolare	35°
Ampiezza Spettro(FWHM)	0.5 nm
Allineamento statico	< $\pm 3^\circ$
Accuratezza posizione	< $\pm 100 \mu\text{m}$

Struttura	SM
Efficienza differenziale	0.7 mW/mA
Fotocorrente Monitorata	0.4 mA
Tensione diodo	5 V +/- 0.5 V
Temperatura operativa	-60°C...+60°C

Tabella 3.3: Caratteristiche Tecniche del laser del sistema ottico

3.3.4 Fotorivelatore

Il rivelatore utilizzato in MicroMED per misurare la luce diffusa dalle particelle è un fotodiodo. Il fotodiodo, se investito da luce, restituisce un segnale in corrente per effetto fotoelettrico. Il sensore utilizzato è stato acquistato dalla Pelkin Elmer e possiede una buona risposta nell'infrarosso. Le specifiche tecniche sono raccolte nella tabella 3.4. Le dimensioni sono rappresentate nell'immagine 3.14

Fotorivelatore	
Produttore	PerkinElmer
Modello	C30809
Tipo	Silicon PIN photodiode
Configurazione	TO8 Package
Lunghezza d'onda (λ)	400-1110 nm
Area sensibile	50 mm ²
Tensione inversa DC (V_R)	< 100 V
Densità di corrente a 22°C (J_p)	5 mA/mm ² (average) - 20 mA/mm ² (peak)
Corrente diretta (I_F)	10 mA (average) - 20 mA (peak)
Tensione di rottura (V_{BR})	100 V
Responsività	0.5 A/W at $\lambda = 808$ nm 0.6 A/W at $\lambda = 900$ nm
Efficienza quantica	83% at $\lambda = 900$ nm

Corrente oscura (I_d)	$2.5 \cdot 10^{-8}$ A at 10 V $7.0 \cdot 10^{-8}$ A at 45 V
Rumore di Fondo (I_n)	$1.5 \cdot 10^{-13}$ A/Hz ^{1/2}
Capacità intrinseca (C_d)	35 pF
Tempo di salita (t_r)	10 ns at $R_L = 50 \Omega$, $\lambda = 900$ nm
Tempo di discesa	15 ns at $R_L = 50 \Omega$, $\lambda = 900$ nm
Temperatura operativa	-40°C...+80°C

Tabella 3.4: Caratteristiche Tecniche del fotorivelatore utilizzato per MicroMED

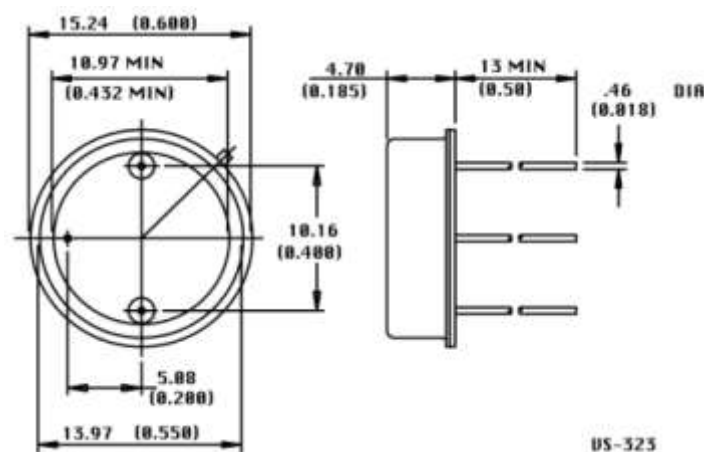


FIGURA 3.14: SPECIFICHE TECNICHE DEL FOTORIVELATORE C30809.

3.3.5 Pompa

La pompa (figura 3.15) modello G 6/04 EB della Thomas è stata selezionata perché capace di lavorare alla pressione marziana di 6 mBar. La tensione nominale di alimentazione è 6 Volt. A questa tensione e alla pressione di 6 mBar il flusso massimo aspirato dalla pompa è pari a 4.7 litri al minuto. Le caratteristiche della pompa sono riassunte nella tabella 3.5.



Figura 3.15: Pompa G6/04 EB Thomas.

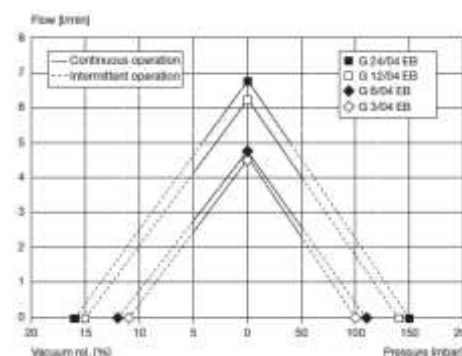


Figura 3.16: Curva di lavoro della pompa G6/04 EB

La curva di lavoro della pompa è mostrata in figura 3.16. Sono stati eseguiti dei test sulla pompa per misurare il flusso d'aria che attraversa MicroMED, a varie tensioni di alimentazione.

Pompa	
Produttore	Thomas
Modello	G 6/04 EB
Codice	50102
Portata Massima	4.7 l/min
Pressione max di intermittenza	110 mbar
Pressione max continua	50 mbar
Vuoto max d'intermittenza	15%
Vuoto max continuo	5%
Motore	Ironless Core DC
Tensione nominale	6 V DC
Consumo in corrente	0.16-0.48 A
Classe di protezione	IP50
Temperatura operativa	-30...+50°C
Peso	100 g

Tabella 3.5: Caratteristiche tecniche della pompa di MicroMED

3.3.6 Elettronica di Prossimità (PE)

L'elettronica di prossimità (Figura 3.17) è costituita da un circuito elettrico capace di convertire il segnale in corrente uscente dal fotodiodo, in un segnale in tensione amplificato. La scheda elettronica presenta due stadi di amplificazione lineare: a basso e alto guadagno. Il canale a basso guadagno presenta un fattore di amplificazione di 10^5 , quello ad alto guadagno un fattore di 10^7 .

I fattori di amplificazione sono molto elevati poiché la luce diffusa dalle particelle produce dei segnali di corrente molto piccoli, dell'ordine dei nA.

Gli stadi di amplificazione hanno una dinamica che varia tra 0-10 Volt e cioè riescono ad amplificare un segnale portandolo al massimo a 10 V. La scheda elettronica è situata all'interno del corpo principale di MicroMED.



Figura 3.17: Elettronica di Prossimità (PE)

3.3.7 Mock-up MicroMED e Test eseguiti

Nei paragrafi precedenti sono stati descritti gli elementi che costituiscono MicroMED. Per effettuare i test sono stati realizzati due prototipi del sensore con finalità differenti. Il primo prototipo (figura 3.18) è stato costruito per eseguire i test di fluidodinamica, il secondo (figura 3.19) invece è stato utilizzato per verificare il corretto funzionamento di MicroMED e calibrare il sensore.

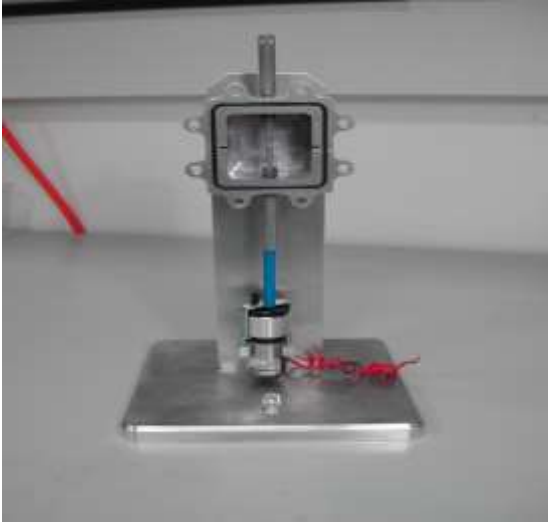


Figura 3.18: Prototipo per test fluidodinamici



Figura 3.19: Prototipo completo di MicroMED

Nel primo prototipo sono assenti il sistema ottico e l'elettronica di prossimità.

Gli obiettivi del lavoro di tesi hanno riguardato in primis la realizzazione di un MGSE ovvero di un sistema di controllo e monitoraggio delle caratteristiche atmosferiche (pressione, temperatura e dispersione di polveri) all'interno di una camera di simulazione Marziana.

Per simulare le condizioni atmosferiche di Marte è stato realizzato un sistema di iniezione di particelle nella camera ed un sistema di pompaggio e controllo della pressione per l'esecuzione dei test sul prototipo dello strumento MicroMED.

L'altro obiettivo ha riguardato la realizzazione di un EGSE, cioè di un sistema di controllo via S/W delle operazioni dello strumento MicroMED, e dell'acquisizione e archiviazione delle misure effettuate.

I test eseguiti sui prototipi sono :

- ❖ Test fluidodinamici: per verificare l'assenza di moti turbolenti e la creazione di vortici all'interno del sensore MicroMED e la focalizzazione del flusso di particelle nel volume di campionamento.
- ❖ Test su Sistema Ottico: per caratterizzare il volume di campionamento.
- ❖ Test su PE: per misurare le prestazioni dell'elettronica di prossimità (PE) di MicroMED
- ❖ Test MicroMED: verifica del corretto funzionamento del sensore e calibrazione dello strumento con confronto tra dati teorici basati sulla teoria di Mie e dati sperimentali.

4. Test Fluidodinamici

MicroMED è stato progettato per aspirare e misurare la distribuzione dimensionale delle particelle in sospensione nell'atmosfera marziana. I test eseguiti nelle condizioni atmosferiche marziane sul prototipo di MicroMED, hanno permesso di verificare il corretto funzionamento del sistema di aspirazione e la dinamica del flusso di particelle.

Il sistema di aspirazione di MicroMED è costituito dalla pompa, dall'inlet e dall'outlet. Gli obiettivi dei test effettuati sono stati:

- Verifica del sistema di aspirazione.
- Verifica di presenza di moti turbolenti e vortici.
- Verifica della dinamica del flusso di particelle all'uscita dell'inlet di MicroMED.

I risultati dei test sono stati confrontati con i dati forniti dalle simulazioni realizzate utilizzando il disegno fluidodinamico di MicroMED.

4.1 Apparato sperimentale per ricreare le condizioni atmosferiche di Marte.

Il primo obiettivo del lavoro di tesi ha riguardato la realizzazione di un MGSE, cioè un sistema di controllo e monitoraggio delle caratteristiche atmosferiche, per simulare l'ambiente marziano.

Il set-up sperimentale, con cui sono stati eseguiti tutti i test, deve essere capace di riprodurre le caratteristiche dell'atmosfera marziana, ovvero pressione, presenza di polvere e composizione.

Per ricreare le condizioni atmosferiche di Marte è stata utilizzata una camera da vuoto cilindrica di raggio 1,34 m e lunghezza di 2,05 m, come mostrato in figura 4.1.



Figura 4.1: Camera da vuoto per simulare l'atmosfera marziana

La pressione media su Marte è di circa 6 - 7 mbar. Tale valore è stato ottenuto nella camera di simulazione, utilizzando un sistema di pompaggio costituito da due pompe in cascata: una Tri_Scroll 600 Series Dry Scroll della Varian (figura 4.2), ed una Turbo V-750 Twis Torr (figura 4.3). Il sistema

di pompe può generare nella camera un vuoto massimo di circa 10^{-4} mBar, quindi adeguato a riprodurre i 6 mBar corrispondenti alla pressione marziana. La pompa Scroll è anche dotata di una valvola VPI che blocca il flusso nel verso della pompa quando la stessa cessa di funzionare.



Figura 4.2: Pompa Scroll 600



Figura 4.3: Turbo V-750 Twis Torr

Il monitoraggio della pressione è effettuato con il sensore compact capacitance gauge della Pfeiffer figura 4.4. Esso misura in un intervallo tra 0- 1000 mBar.



Figura 4.4: Sensore di Pressione

Il sensore è collegato ad un controller esterno con il quale si visualizza il valore della pressione nella camera.

L'atmosfera marziana è costituita da un'alta concentrazione di polvere. Di conseguenza per ottenere le medesime condizioni devono essere introdotte particelle di varie dimensioni nella camera. Empiricamente, dopo vari esperimenti è stato realizzato un sistema di iniezione capace di far fluire all'interno della camera migliaia di particelle.

Il sistema mostrato in figura 4.5 è costituito da un dispenser che genera un aerosol di particelle, nebulizzando una soluzione costituita da acqua e particelle, una seconda camera cilindrica da vuoto di dimensioni notevolmente minori rispetto alla prima ed una valvola gate. Il dispenser Grimm Aerosol Dispensers mod 7811 genera un flusso di aria e particelle pari a 7 l/min per nebulizzazione. La nebulizzazione (talvolta detta impropriamente "atomizzazione") è la riduzione di un liquido in parti minutissime (gocce), che si ottiene ad esempio facendo scontrare il liquido con un getto d'aria ad elevata velocità oppure costringendo il liquido a passare attraverso un orifizio avente una sezione

di passaggio molto stretta. Tanto più stretta sarà la sezione di passaggio dell'orifizio, tanto maggiore sarà la pressione a cui il liquido è sottoposto

La seconda camera ha dimensioni di 30 cm di diametro x 25 cm di altezza. La valvola gate come mostrato in figura 4.5 è manuale. Il sistema di iniezione è stato collegato alla parte superiore della prima camera. Tra la seconda camera e la prima è presente la valvola gate.

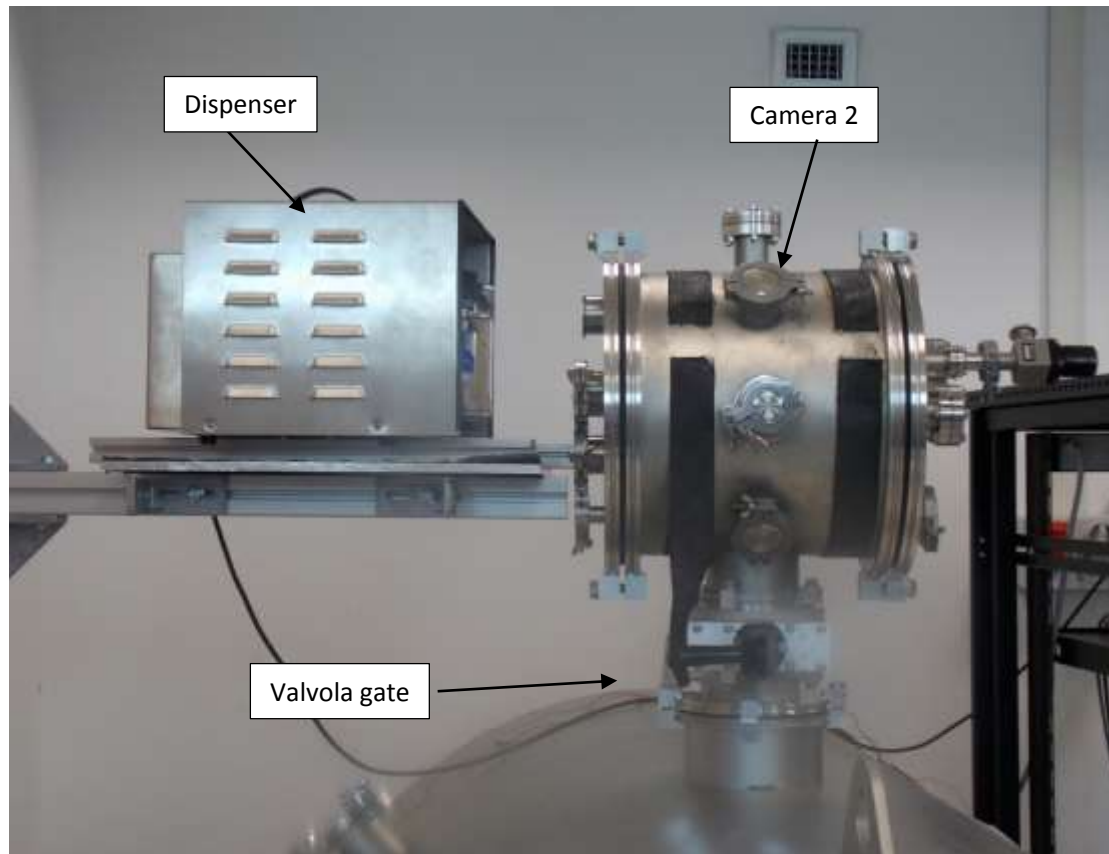


Figura 4.5: sistema di iniezione delle particelle

La camera numero 1 possiede dei feed through, particolari condotti, attraverso i quali è possibile iniettare CO₂, l'elemento più abbondante dell'atmosfera di Marte. L'atmosfera marziana infatti è costituita per il 97 % da CO₂.

4.1.1 Misure della distribuzione delle particelle nella camera 1

Realizzato l'MGSE, sono state effettuate una serie di misure per verificare la funzionalità del sistema di iniezione e la distribuzione delle particelle nella camera 1.

Per i test sono stati utilizzati dei dischi cilindrici posizionati nella camera. L'uso dei dischi è ben presto spiegato. Il sistema di iniezione, se efficiente, genera un aerosol di particelle che si distribuisce all'interno della camera 2.

Per differenza di pressione tra la camera 1 (1 mBar) e camera 2 (1 atm) le particelle sono risucchiate nella camera di simulazione distribuendosi internamente. Raggiunta la condizione di equilibrio di 6 mBar le particelle per gravità si depositano sul fondo della camera e quindi sui dischi posizionati alla base della camera. Alla fine del processo di settling (deposito) i dischi sono stati analizzati al SEM (Microscopio Elettronico a Scansione).

I dischi sono stati numerati, ciascuno corrisponde ad una posizione ben precisa all'interno della camera. In particolare i dischi 3, 4, e 5 sono stati posizionati in corrispondenza della valvola gate che rappresenta l'ingresso delle particelle nella camera 1. I dischi 1, 2 e 6 sono stati posizionati rispettivamente ad un metro dal disco 3, a 0.7 metri dal disco 3 e 0.15 cm dal disco 5.

Il test è stato eseguito utilizzando le particelle aventi dimensione 0.5, 1.30, 2.8, 4.32, 6.36, 8.43, 11, 14.98 μm .

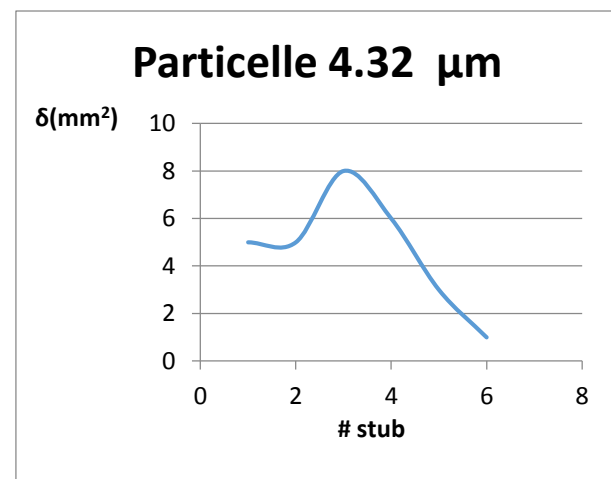
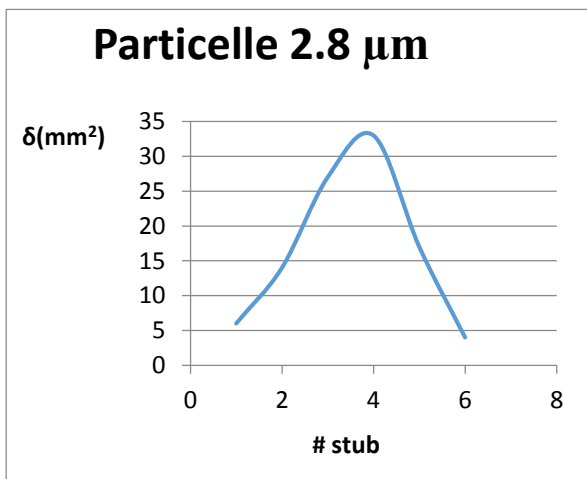
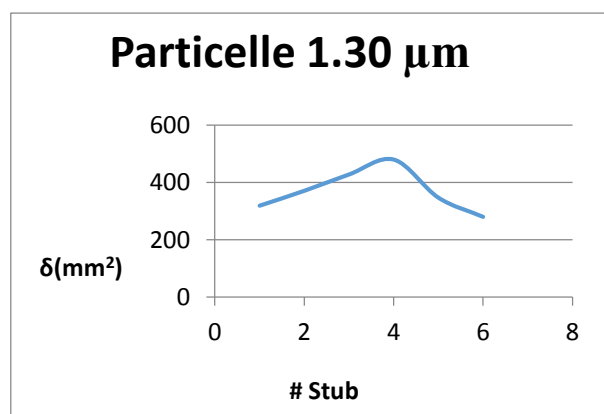
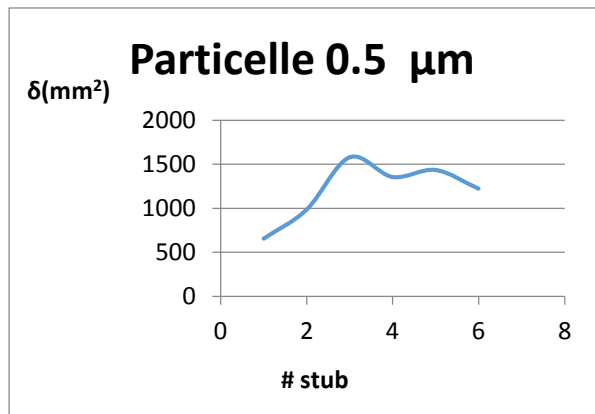
I risultati sono mostrati in figura 4.6 dove è riportato l'andamento della densità numerica delle particelle in funzione della posizione dei dischi, al variare della dimensione delle particelle.

Sull'asse delle ordinate è presente il valore delle densità, sull'asse delle ascisse è mostrata la posizione dei dischi.

Dai grafici si evince che il sistema di iniezione così realizzato è funzionale essendo capace di iniettare nella camera di simulazione tutto il set di particelle utilizzato.

Dall'analisi dei dischi risulta anche che le particelle con diametro minore tendono a disperdersi maggiormente distribuendosi quasi uniformemente in tutta la camera, mentre le particelle con diametro maggiore tendono a distribuirsi nella regione corrispondente all'ingresso delle particelle (area sottostante la valvola gate).

Dai risultati dei test è stato possibile individuare la posizione ottimale in cui la distribuzione di particelle raggiunge il picco massimo. In tale posizione, corrispondente ai dischi 3 e 4, saranno installati i prototipi di MicroMED per i test successivi.



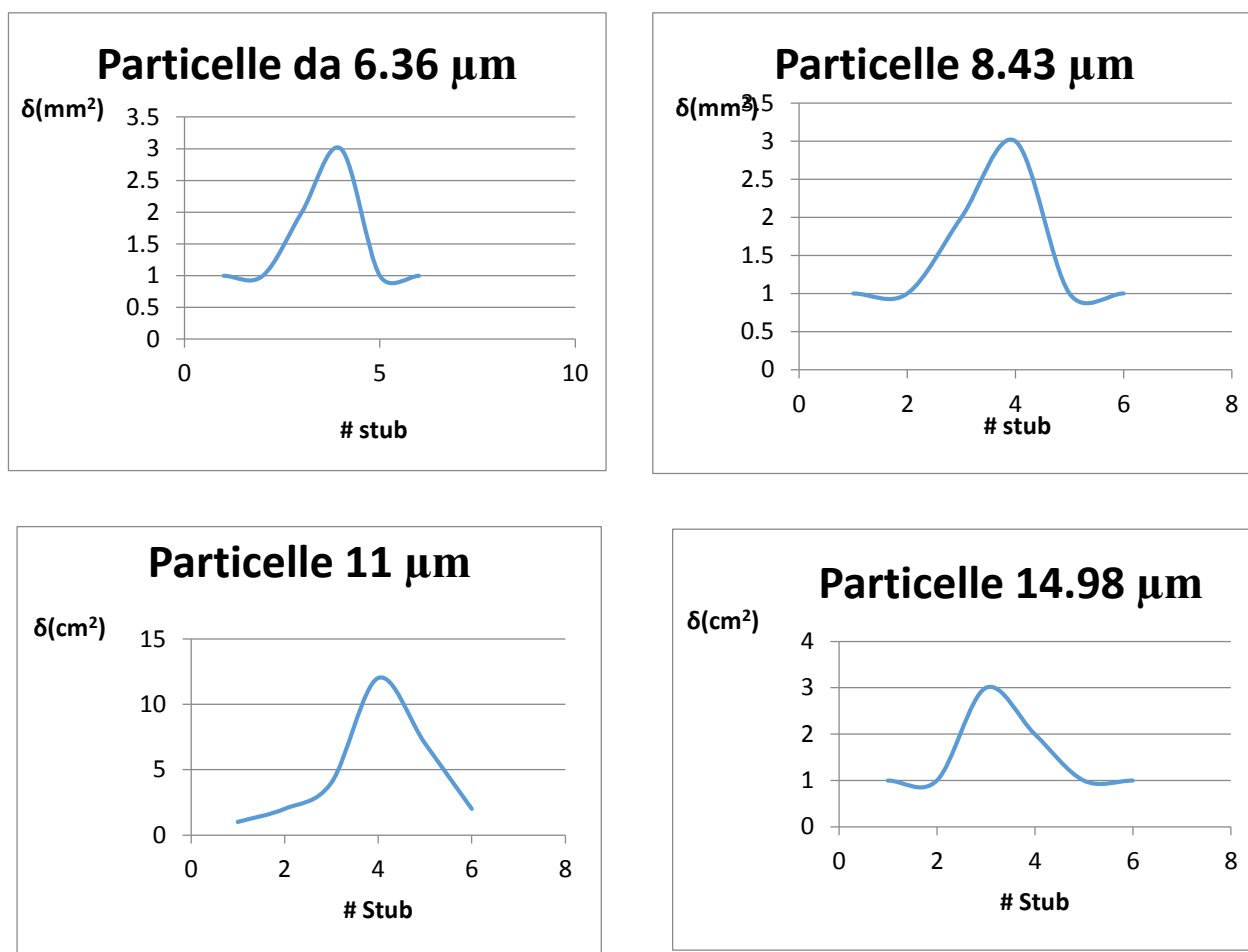


Figura 4.6: Distribuzione delle particelle in funzione della posizione dei dischi di campionamento posizionati nella camera 1.

4.2 Simulazioni eseguite sul disegno fluidodinamico di MicroMED

Le simulazioni sono state eseguite sulla base del disegno fluidodinamico progettato in ambiente CAD e mostrato in figura 4.7. Lo scopo delle simulazione è stata lo studio del comportamento del flusso di particelle aspirate dalla pompa, durante l'attraversamento dei condotti inlet ed outlet di MicroMED. Gli obiettivi delle simulazioni sono stati:

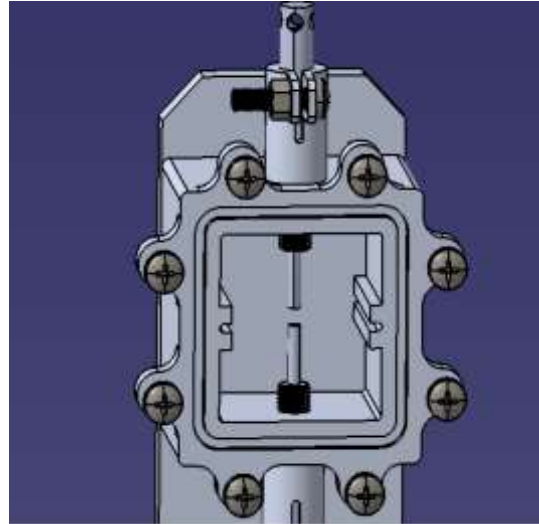
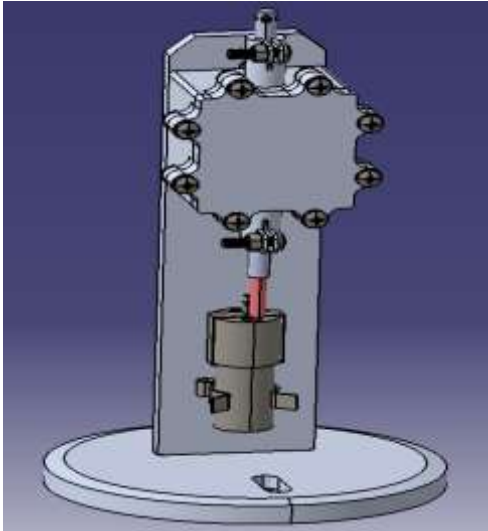


Figura 4.7: Progetto di MicroMED eseguito in CAD

- 1) Studio del flusso di particelle e verifica della presenza di moti turbolenti e vorticosi.
- 2) Quantificare la dispersione delle particelle rispetto alla direzione del moto centrale del flusso, corrispondente al centro del volume di campionamento.

Il primo punto evidenzia se le particelle si muovono in un fluido con regime laminare o turbolento. Un regime turbolento è il moto di un fluido in cui le forze viscosive non sono sufficienti a contrastare le forze di inerzia, quindi il moto delle particelle nel fluido risulta caotico e cioè non segue traiettorie ordinate come nel caso di regime laminare.

Per cui se il fluido aspirato da MicroMED è in regime turbolento il cammino delle particelle nel fluido sarà caotico. In questo caso le particelle possiedono un'alta probabilità di non attraversare il volume di campionamento e di depositarsi su elementi sensibili come specchio e fotodiodo interferendo con le misure.

La simulazione per lo studio del flusso di particelle aspirato da MicroMED è stata eseguita in ambiente Fluent considerando un flusso costituito da CO_2 e particelle con diametro di $0.2 \mu\text{m}$ ad una pressione marziana di 600 Pa e temperatura di 300 K (Ventura, S. 2011).

In figura 4.8 è mostrato il risultato della simulazione circa la dinamica del flusso. Dalla figura risulta chiaro che il moto delle particelle non è turbolento e non ci sono moti vorticosi che potrebbero creare disturbi. La barra sulla sinistra indica la velocità delle particelle.

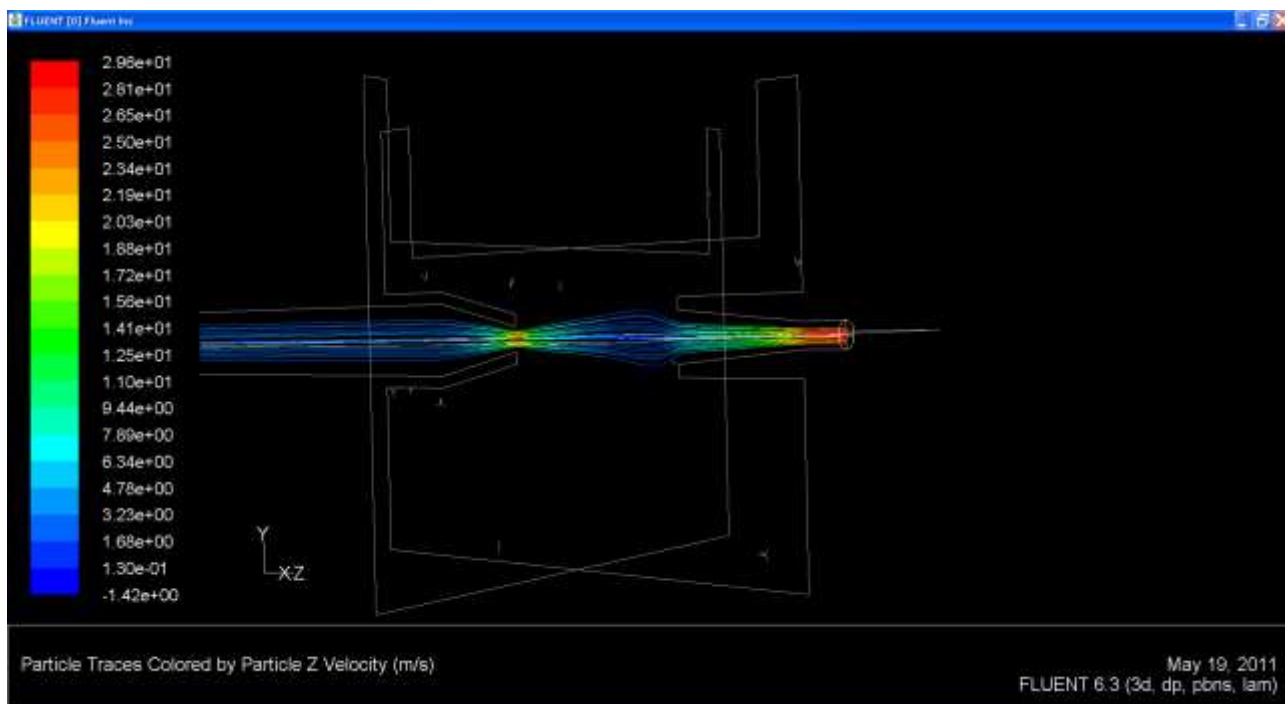


Figura 4.8: Risultati simulazioni fluidodinamiche (Ventura, S. 2011).

Il secondo punto permette di verificare se l'intero flusso di particelle attraversa il volume di campionamento. Nel caso in cui le particelle subissero deviazioni considerevoli rispetto alle dimensioni del volume di campionamento, non potrebbero essere rivelate, portando ad una sottostima della densità numerica delle particelle.

Questa simulazione è stata eseguita per studiare la larghezza del flusso di particelle e quindi la deviazione delle particelle rispetto all'asse centrale del moto del flusso. Lo studio è stato effettuato considerando quattro diverse dimensioni delle particelle: 1, 5, 10 e 20 μm di diametro.

Gli obiettivi di questa simulazione sono due. Il primo obiettivo prevede una stima della dispersione che subiscono le particelle, all'uscita dell'inlet, rispetto al centro del volume di campionamento.

Il secondo obiettivo prevede una stima di quante particelle potrebbero non essere rivelate perché subiscono una deviazione considerevole transitando oltre il volume di campionamento. La direzione del volume di campionamento considerata in questa simulazione è perpendicolare al flusso di particelle; la dimensione è di 0.518 mm.

In figura 4.9 è mostrato il risultato della simulazione (Ventura, S. 2011). In figura, lo 0 rappresenta il centro del volume di campionamento e corrisponde all'asse centrale del moto del flusso di particelle. I valori sull'asse delle ascisse indicano la posizione rispetto al centro del volume di campionamento in cui sono transitate le particelle. L'asse delle ordinate indica la percentuale di particelle che sono transitate in un certo punto.

Come mostrato in figura 4.9, il flusso di particelle con un diametro di 1 μm presenta una dispersione rispetto al centro del volume di campionamento pari a 0,2 mm. In questo caso le particelle con diametro di 1 μm transitano tutte all'interno del volume di campionamento. Il flusso costituito da particelle di 5 μm presenta una dispersione di 0.2 mm ma una piccola percentuale di esse è presente anche a 0.3 e 0.4 mm. Di conseguenza le particelle che transitano a 0.3 e 0.4 non potranno essere rilevate perché non intercettano il volume di campionamento.

Il flusso costituito dalle particelle di diametro sia di 10 μm che di 20 μm ha una dispersione minore di 0.2 mm. Quindi tutte le particelle con questi diametri transiteranno all'interno del volume di campionamento.

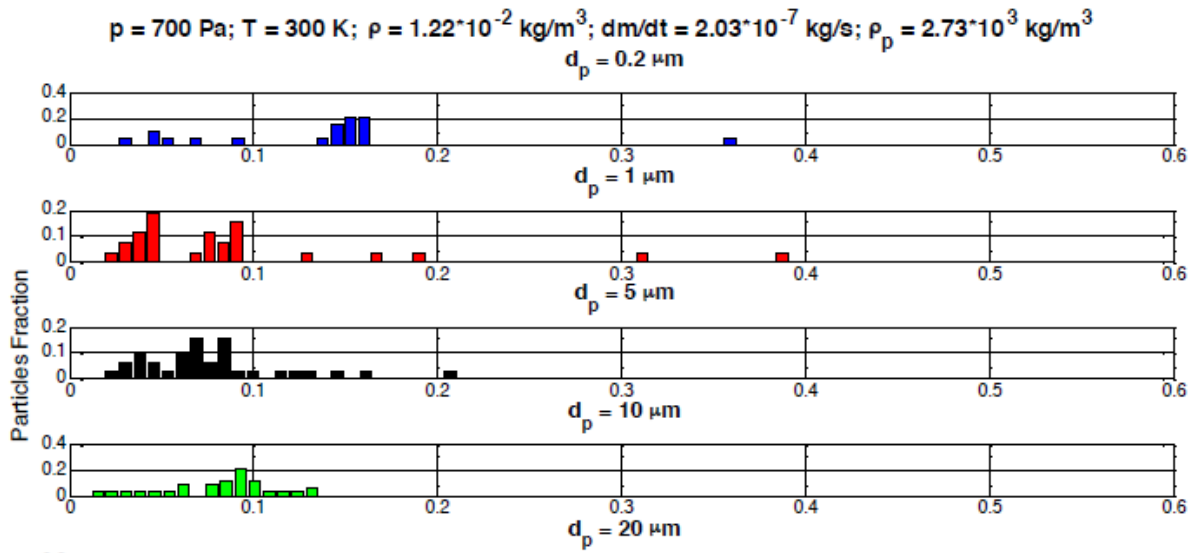


Figura 4.9: Risultato della simulazione effettuata per lo studio della dispersione del flusso di particelle rispetto al centro del volume di campionamento (Ventura, S. 2011).

4.3 Test Fluidodinamici

I test fluidodinamici sono stati eseguiti sul prototipo di MicroMED e i risultati confrontati con i dati forniti dalle simulazioni.

I test hanno avuto lo scopo di confermare l'assenza di moti turbolenti e di vortici all'interno di MicroMED e soprattutto di misurare la dispersione subita dalle particelle e confrontarla con il risultato della simulazione. Sono state realizzate le seguenti misure:

- 1) Verifica dell'assenza dei moti turbolenti e vortici all'interno di MicroMED.
- 2) Misura della dispersione del flusso di particelle rispetto al centro del volume di campionamento.

I test sono stati eseguiti sul prototipo di MicroMED, mostrato in figura 4.10 ossia il modello costituito dalla sola scatola dello strumento oltre all'inlet, l'outlet e la pompa. Non sono presenti il sistema ottico e l'elettronica di prossimità, considerati non rilevanti ai fini di tali test.

L'apparato sperimentale usato per eseguire i test fluidodinamica è costituito dalla camera di simulazione dell'atmosfera di Marte (Figura 4.11), alcune cornici di alluminio appositamente disegnate e realizzate (Figura 4.12) e dischi di alluminio con superficie coperta da carbonio adesivo e wafer di silicio.

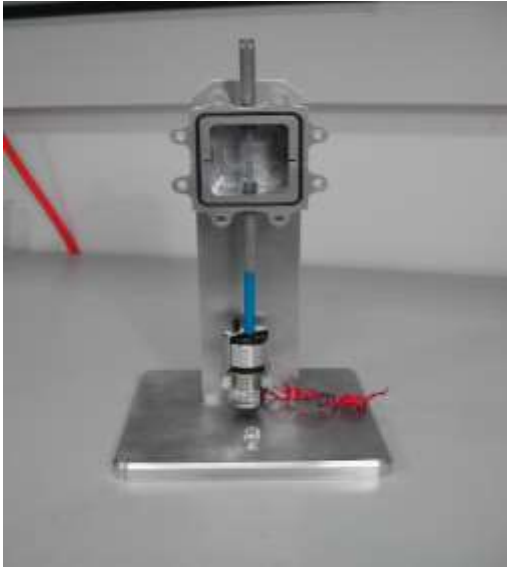


Figura 4.10: Prototipo di MicroMED per test fluidodinamici



Figura 4.11: Camera di simulazione atmosfera marziana



Figura 4.12: Cornice di alluminio con lama

4.3.1 Misure per la verifica dell'assenza di moti turbolenti e vortici all'interno di MicroMED

L'obiettivo del test è quello di verificare il regime del moto del fluido aspirato da MicroMED. Per capire se il moto del fluido è turbolento o laminare abbiamo misurato il numero di particelle disperse all'interno di MicroMED. Infatti un moto turbolento induce le particelle, uscenti dall'inlet, ad un moto caotico facilitando la dispersione delle particelle all'interno del box del sensore.

Se il regime del fluido è laminare le particelle seguono traiettorie regolari, quindi attraversano i condotti interni di MicroMED e fuoriescono dall'outlet esterno senza subire deviazioni.

Il set-up sperimentale utilizzato per il test è costituito: dalla camera di simulazione, 4 dischi di alluminio ricoperti da un disco di carbonio adesivo, il prototipo di MicroMED e particelle di dimensioni di $0.5\ \mu\text{m}$ di diametro.

I dischi sono stati posizionati all'interno del prototipo accanto all'outlet interno come mostrato in figura 4.13.

I dischi utilizzati nel test hanno avuto lo scopo di intercettare le particelle del flusso potenzialmente deviate dalla traiettoria regolare in caso di regime turbolento e/o in presenza di vortici. L'analisi dei dischi ha previsto un conteggio numerico delle particelle depositate sui dischi con l'ausilio del SEM. Il risultato del test è mostrato nella tabella 4.1. Come si evince dalla tabella il numero di particelle depositate sui dischi è inferiore di 5, quantità statisticamente irrilevante. Il risultato ottenuto dai test sperimentali conferma il risultato della simulazione ovvero il sistema di aspirazione non produce vortici e moti turbolenti.

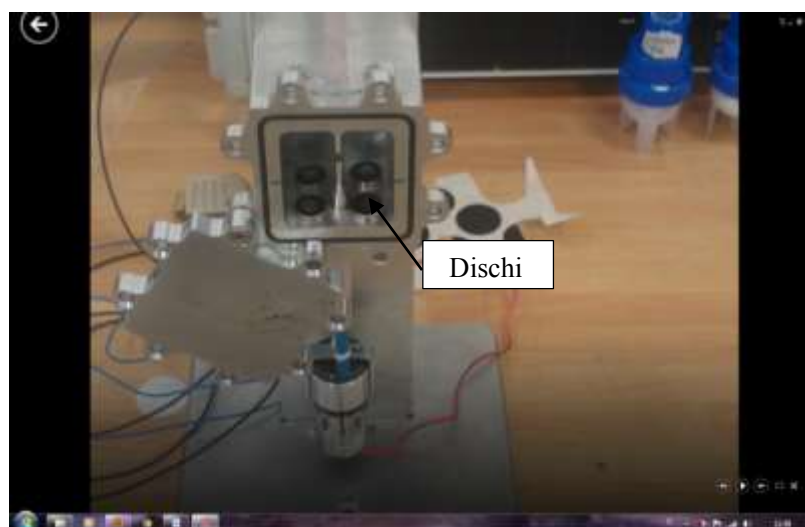


Figura 4.13: Primo prototipo di MicroMED con i dischi inseriti alla base dell'outlet.

Tabella 4.1: Risultato del conteggio delle particelle depositate sui dischi di test

# Disco	# Particelle
1	1
2	3
3	1
4	2

4.3.2 Misura della dispersione del flusso di particelle rispetto al centro del volume di campionamento.

Lo scopo del test è misurare la deviazione che subiscono le particelle rispetto al centro del volume di campionamento. Per quantificare la dispersione sono state realizzate ad hoc delle piccole cornici di alluminio (Fig. 4.12), inseribili nel primo prototipo di MicroMED. Tali cornici hanno forma rettangolare e possiedono una lamella al loro interno necessaria per intercettare il flusso di particelle aspirato da MicroMED.

La lamella delle cornici è posta perpendicolarmente rispetto al flusso di particelle aspirato da MicroMED in modo da poterlo intercettare. Ogni cornice ha una lamella posizionata ad una diversa distanza rispetto al centro del volume di campionamento. In tal modo è possibile misurare la deviazione subita dalle particelle rispetto al centro del volume di campionamento, osservando la deposizione delle particelle sulle varie lamelle.

La distanza della lamella dal centro del volume di campionamento permette una stima della deviazione minima subita dalle particelle. Ad esempio, se su una lamella, che dista 0.4 mm dal centro del volume di campionamento, si osservano particelle depositate, significa che la dispersione del relativo flusso rispetto al centro del volume di campionamento è di almeno 0.4 mm.

Per la misura sono state utilizzate tre cornici aventi la lamella, di larghezza 2 mm, posizionata rispettivamente a 0.4 mm, 0.5 mm e 0.6 mm rispetto al centro del volume di campionamento.

Le cornici sono alloggiare all'interno del primo prototipo di MicroMED attraverso due scanalature di dimensione 2 mm x 36 mm, come mostrato in figura 4.14. In figura 4.15 è mostrato il prototipo con la cornice al suo interno. Sulle lamelle delle cornici è presente una striscia di carbonio adesiva sulla quale le particelle del flusso intercettate restano bloccate.

Le particelle usate in questo test hanno dimensioni di: 0.5, 1.30, 2.8, 4.32, 6.36, 8.43, 11, 14.98 μm .

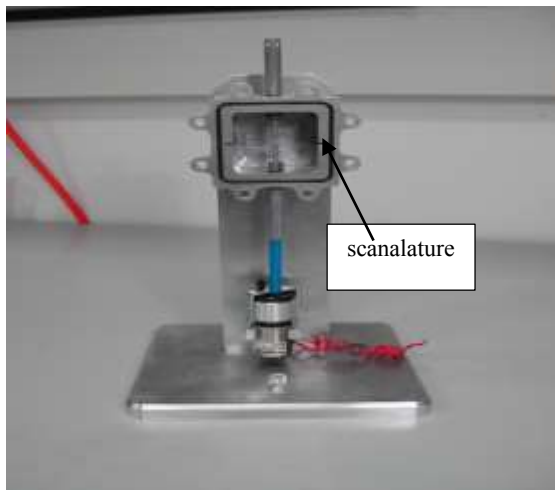


Figura 4.14: Scanalature

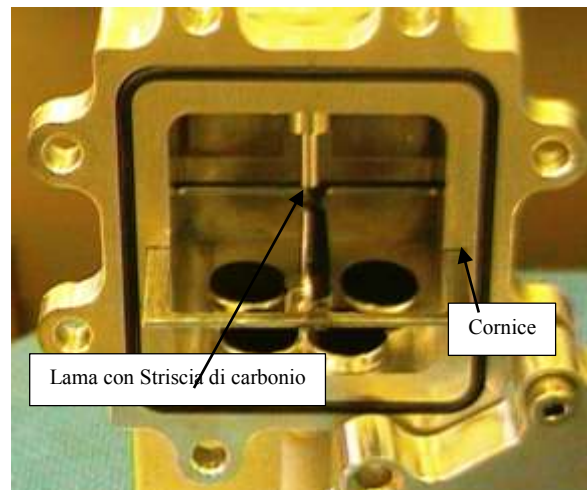


Figura 4.15: Frame all'interno del primo prototipo

Il test si è svolto nel seguente modo. Per ciascuna dimensione di particelle iniettate nella camera, sono state eseguite misurazioni della deviazione del flusso utilizzando le cornici con lamelle distanti 0.4, 0.5 e 0.6 mm rispetto al centro del volume di campionamento. Le misure sono state ripetute anche con le cornici ribaltate in modo da misurare la deviazione delle particelle sia a destra che a sinistra rispetto al centro del volume.

Prima di procedere con il test, è stato verificato se la presenza delle cornici all'interno della scatola di MicroMED potesse indurre una perturbazione sul moto del flusso di particelle.

A tale scopo sono stati posizionati quattro dischi all'interno di MicroMED per contare il numero di particelle deviate dalla traiettoria regolare e disperse nella scatola dello strumento. Le cornici e i dischi sono stati analizzati al SEM.

Dall'analisi dei dischi, riportata in tabella 4.2, emerge che la struttura delle cornici non produce perturbazioni rilevanti. Infatti, il numero di particelle presenti su ciascun disco in funzione della cornice utilizzata è trascurabile.

# Disco	0.4 mm	0.5 mm	0.6 mm
1	8	2	4
2	2	1	2
3	2	8	5
4	3	4	2

Tabella 4.2: Numero di particelle depositate sui dischi di prova posizionati all'interno del prototipo 1 di MicroMED in presenza delle cornici necessarie ai test.

Una volta accertato che l'uso delle cornici non interferisce significativamente sul flusso delle particelle è stata eseguita la misura della deviazione subita dalle particelle. Su tutte le lamelle era presente una striscia di carbonio, sulle quale sono state praticate due incisioni, denominate punto A e punto B come mostrato in figura 4.16. Tali incisioni hanno permesso, durante l'analisi al SEM, di determinare la direzione e il verso dello spostamento del microscopio lungo la lamella.

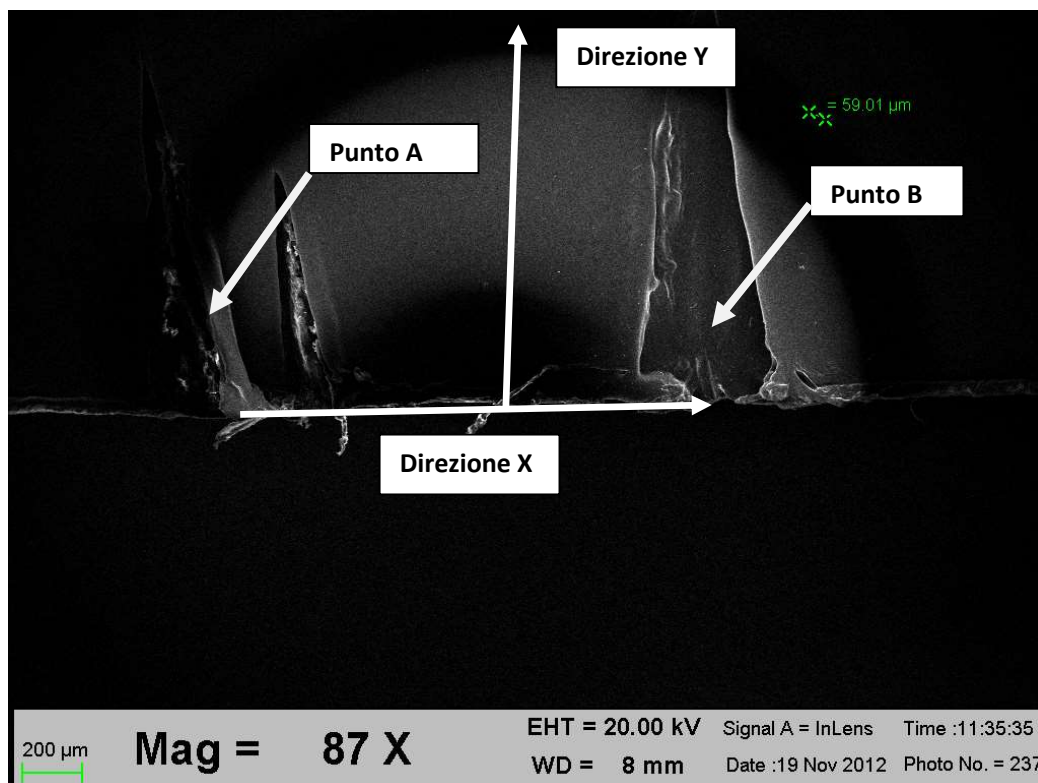


Figura 4.16: Bordo di una lama

Il punto A rappresenta il centro della lamella e il punto B è situato 5 mm dal punto A. L'analisi delle cornici è stata effettuata lungo due direzioni X e Y. Il segmento che unisce il punto A al punto B è

definito come direzione X, mentre la direzione Y è rappresentata dal bordo della lamella in cui è presente il numero massimo di particelle, fino alla fine del bordo opposto alla zona di massima distribuzione.

La procedura di analisi delle lamelle avviene partendo dal punto A lungo la direzione X fino al punto B. Visualizzata la zona del bordo della lamella, prossimo al centro del volume di campionamento, in cui la distribuzione di particelle è massima si prosegue verso il lato opposto della lama lungo la direzione Y.

4.4 Analisi delle cornici

L'analisi delle cornici ha avuto l'obiettivo di visualizzare e quantificare le particelle intercettate dalle lamelle. La determinazione della deviazione subita dalle particelle è fornita dall'osservazione della quantità di particelle depositate sulle lamelle a partire da quelle più vicine al centro del volume di campionamento e proseguendo allontanandosi da questo: se su una lamella si riscontrano particelle depositate e sulla successiva (più distante dal centro del volume di campionamento) no, questo implica che la posizione della penultima lamella utilizzata rappresenta la misura massima della deviazione del flusso. Di seguito sono riportati i risultati, per ciascuna dimensione delle particelle, dell'analisi delle cornici con lamelle distanti ± 0.4 mm, ± 0.5 mm e ± 0.6 mm rispetto al centro.

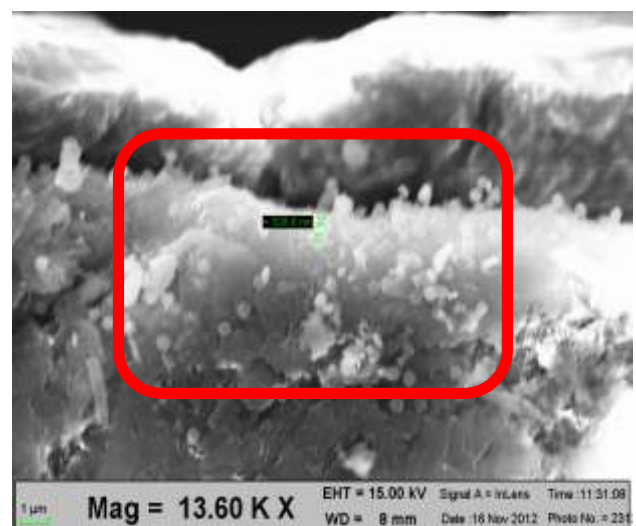
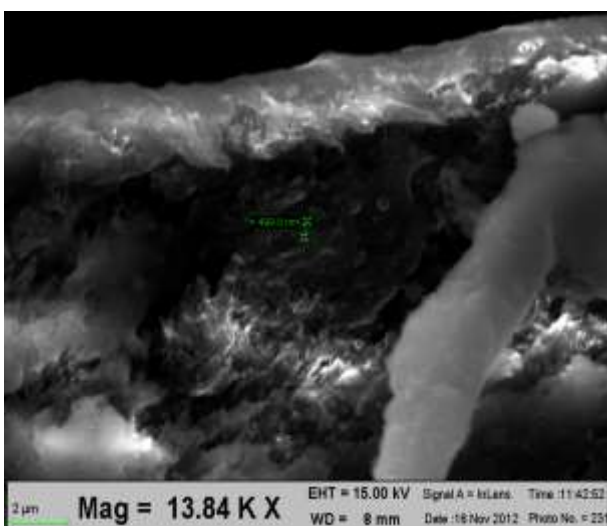
4.5 Analisi delle cornici per un flusso di particelle di $0.5 \mu\text{m}$ di diametro.

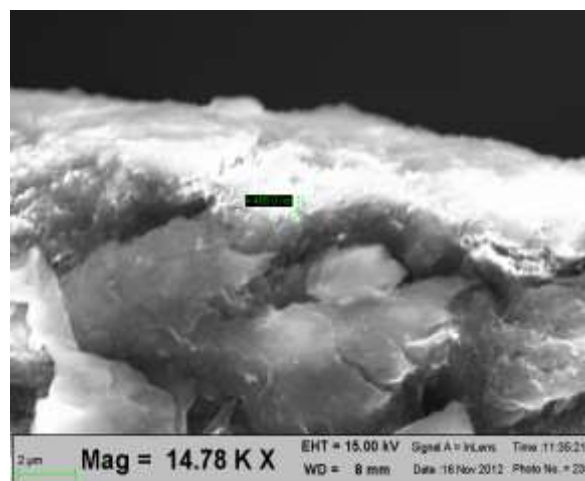
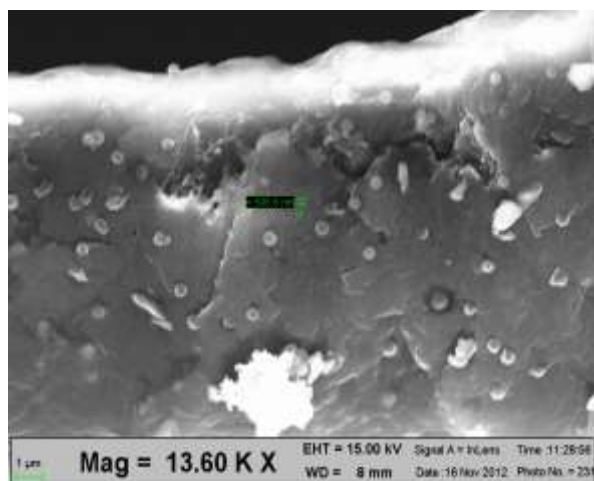
Il primo test della misura della deviazione ha riguardato particelle calibrate con diametro di $0.5 \mu\text{m}$. Dall'analisi delle cornici con lamelle posizionate a ± 0.4 mm e ± 0.5 mm dal centro del volume di campionamento, si riscontra un numero discreto di particelle in direzione X, mentre in direzione Y dopo alcuni micron il numero di particelle si azzerava.

Sulla lamella posta a ± 0.6 mm non sono state visualizzate particelle. Questo implica che la massima deviazione che le particelle da $0.5 \mu\text{m}$ subiscono è pari a 0.5 mm, in pieno accordo con il risultato della simulazione.

Particelle $0.5 \mu\text{m}$ Cornice con lamella posta a 0.4 mm (lato destro) Direzione X

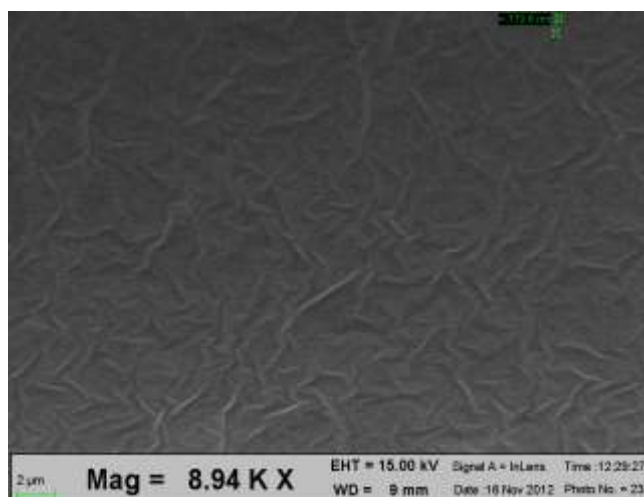
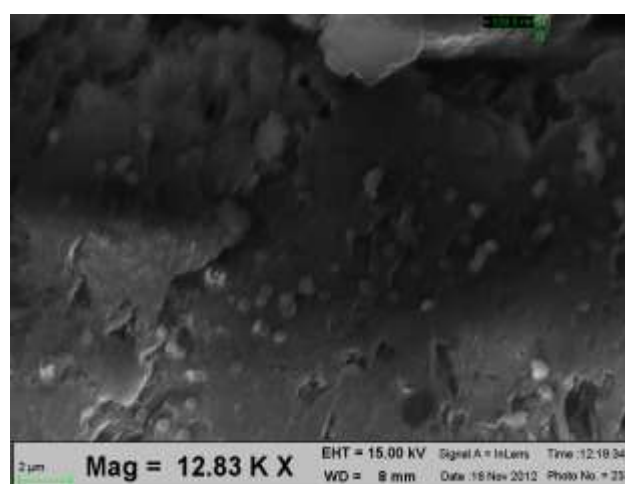
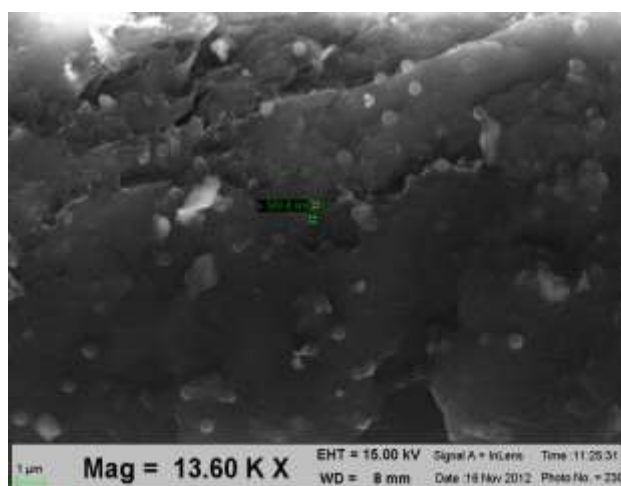
Punto A



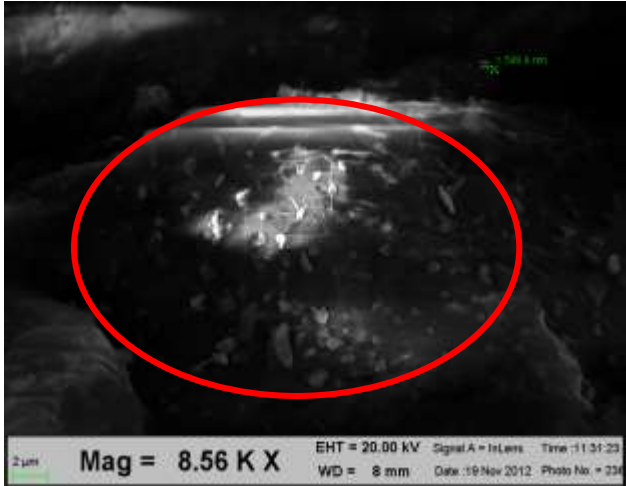
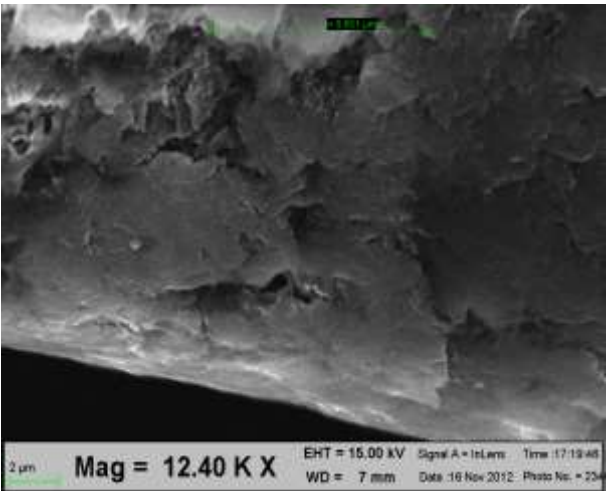


Punto B

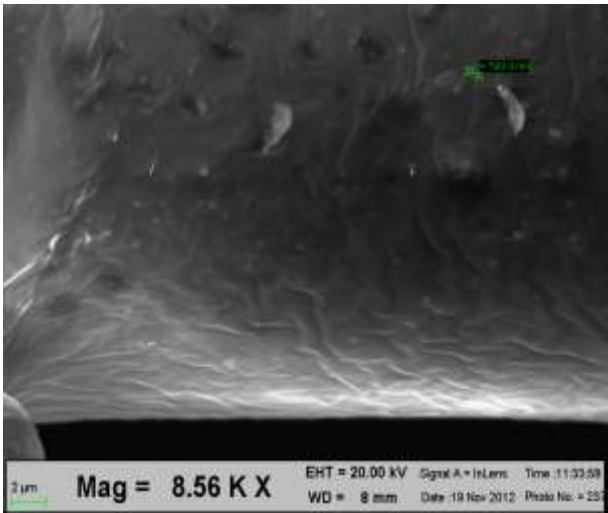
Direzione Y



Particelle 0.5 μm Cornice con lamella posta a 0.4 mm (lato sinistro) Direzione X

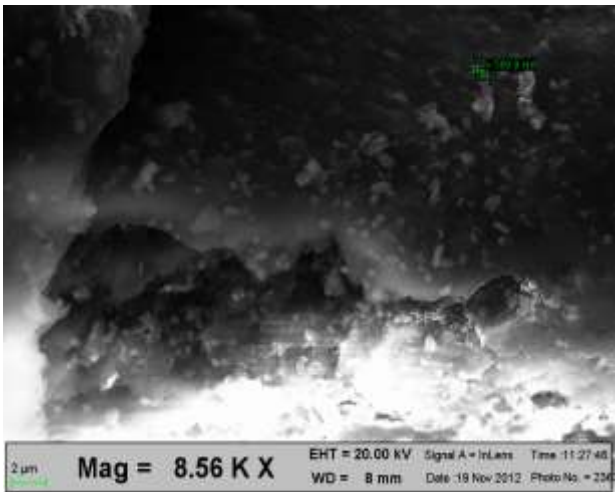
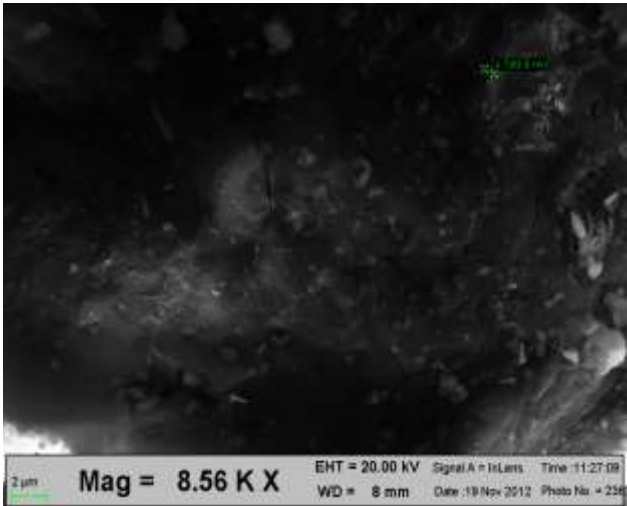


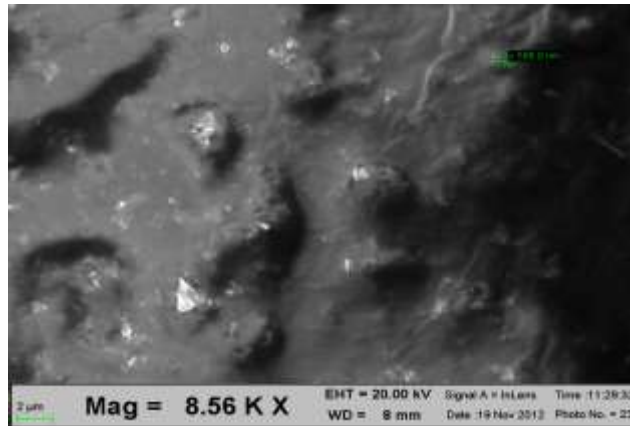
Punto A



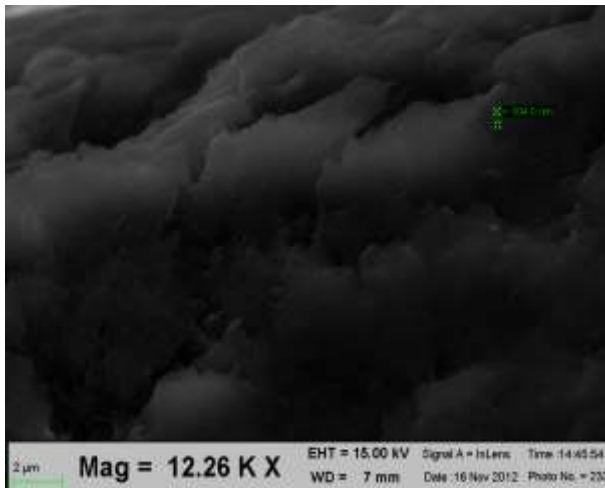
Punto B

Direzione Y

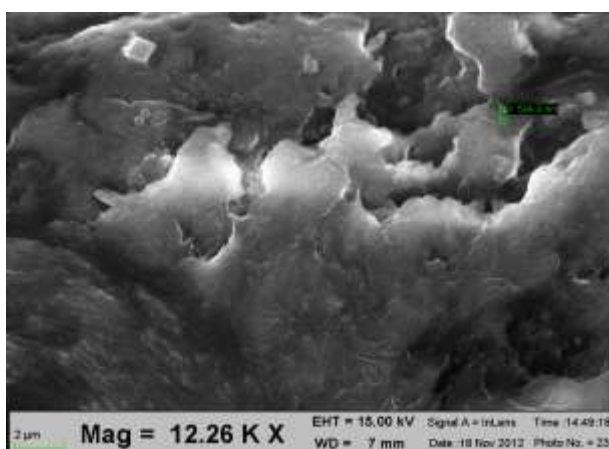




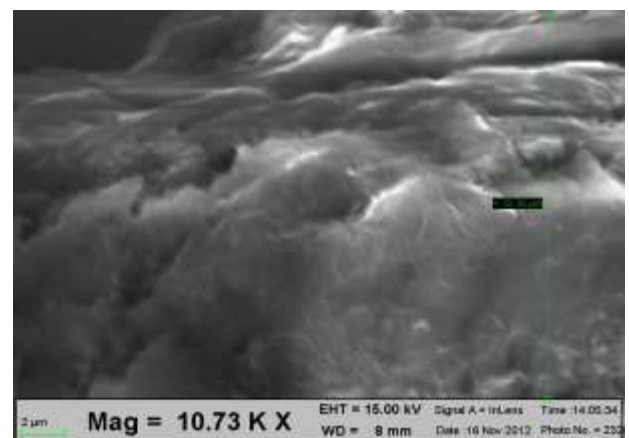
Particelle 0.5 µm Cornice con lamella posta a 0.5 mm (lato destro) Direzione X



Punto A

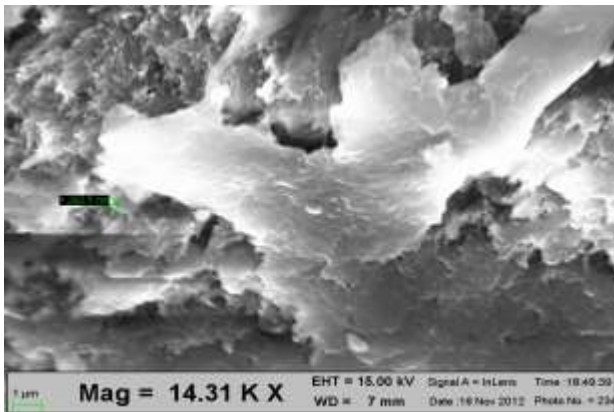


Punto B

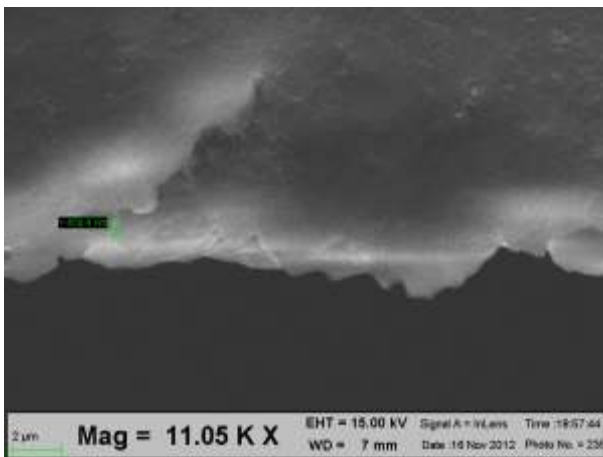
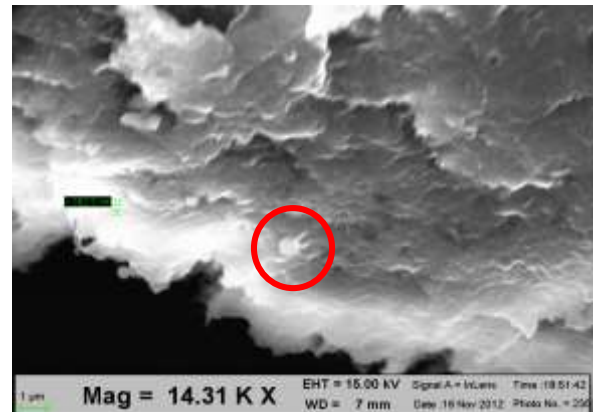


Direzione Y

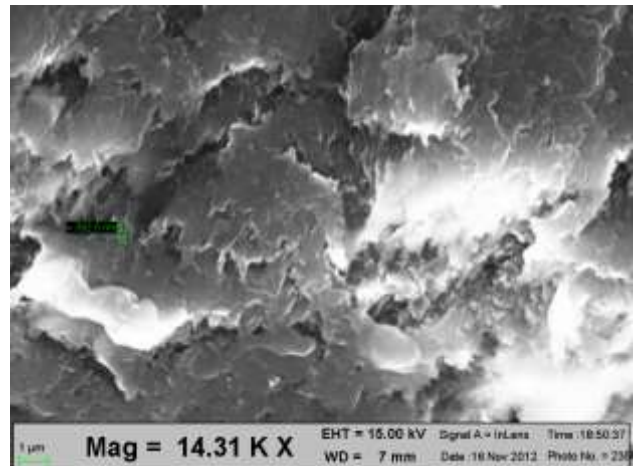
Particelle 0.5 μm Cornice con lamella posta a 0.5 mm (lato sinistro) Direzione X



Punto A

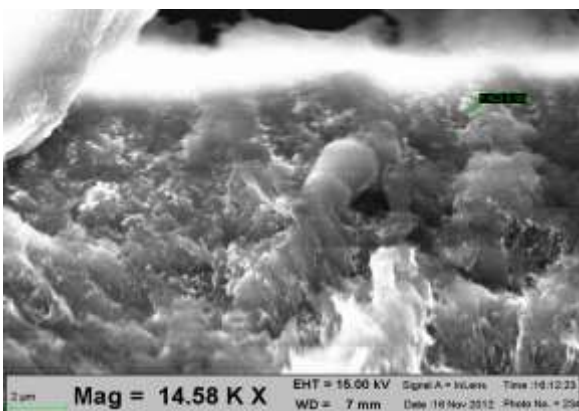


Punto B

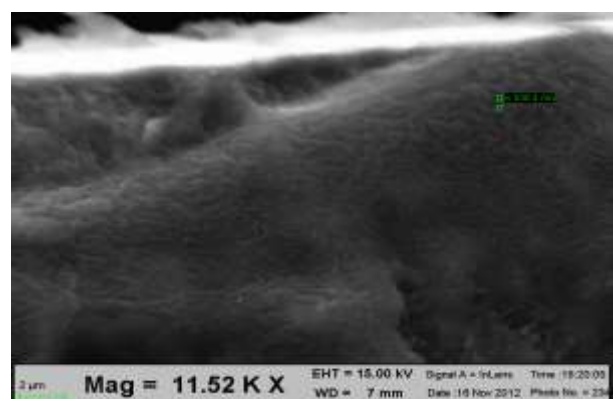


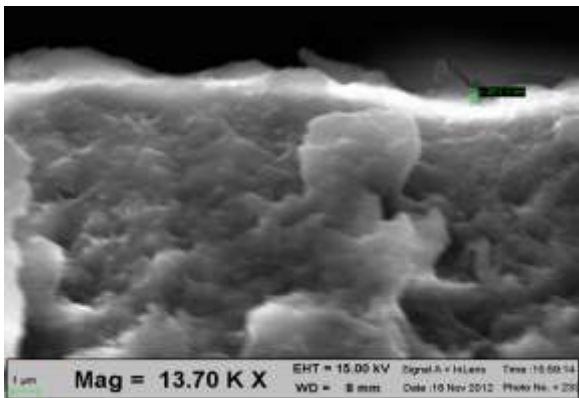
Direzione Y

Particelle 0.5 μm Cornice con lamella posta a 0.6 mm (lato destro) Direzione X

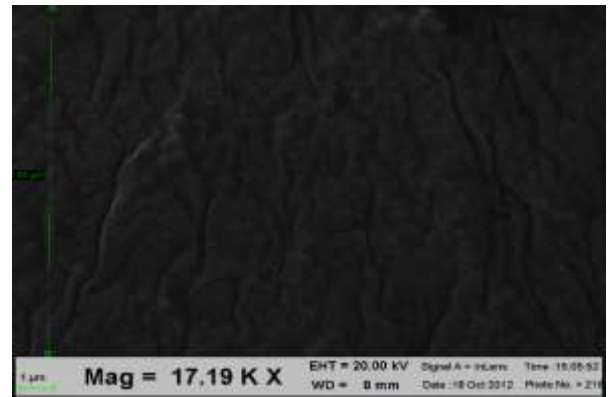


Punto A



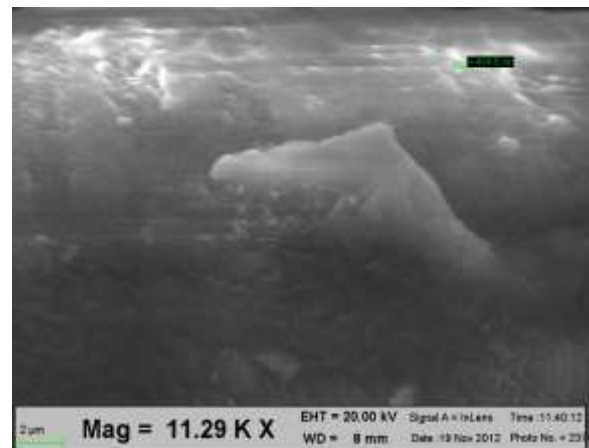
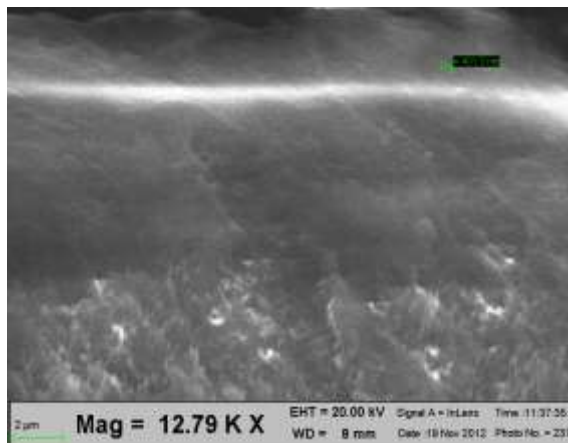


Punto B

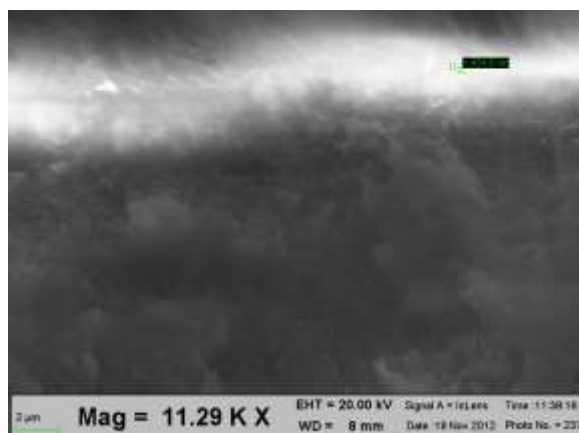


Direzione Y

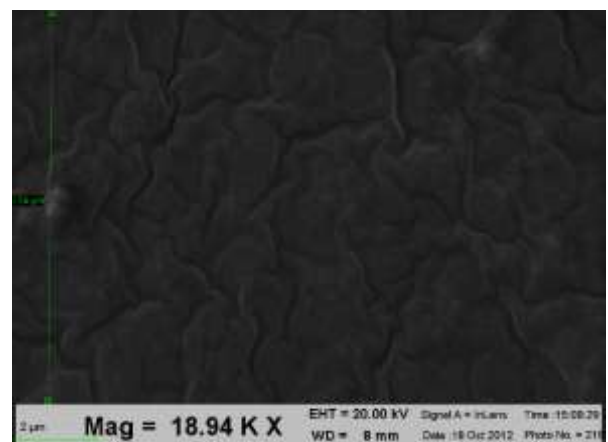
Particelle 0.5 µm Cornice con lamella posta a 0.6 mm (lato sinistro) Direzione X



Punto A



Punto B



Direzione Y

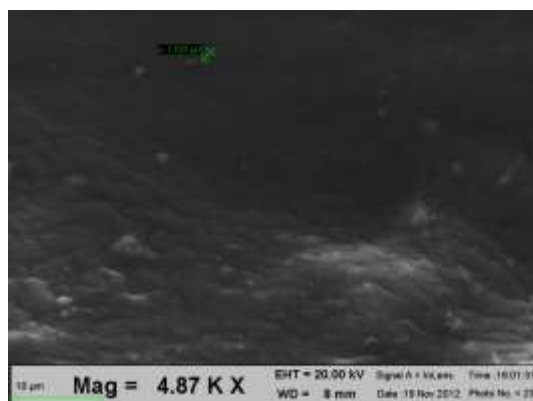
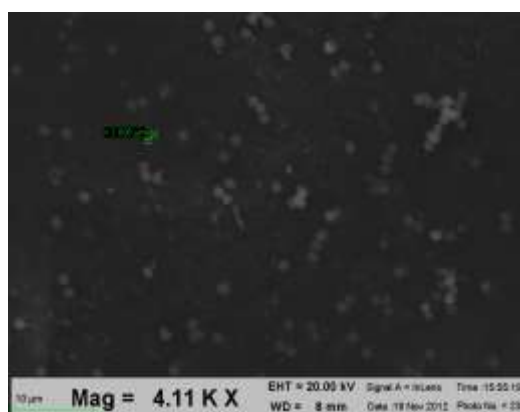
4.6 Analisi delle cornici per particelle di 1.30 μm di diametro

L'analisi delle cornici utilizzate per le particelle da 1.30 μm ha messo in evidenza che la deviazione subita da tali particelle è la stessa riscontrata per le particelle da 0.5 μm . Infatti sulle cornici con lamella distante 0.4 mm e 0.5 mm dal centro del volume il numero di particelle visualizzate è discreto. Invece sulla lamella posta a 0.6 mm non sono state rilevate particelle. Il risultato ottenuto dalla misura è il medesimo evidenziato dal risultato della simulazione fluidodinamica.

Particelle 1.30 μm Cornice con lamella da 0.4 mm (lato destro) Direzione X

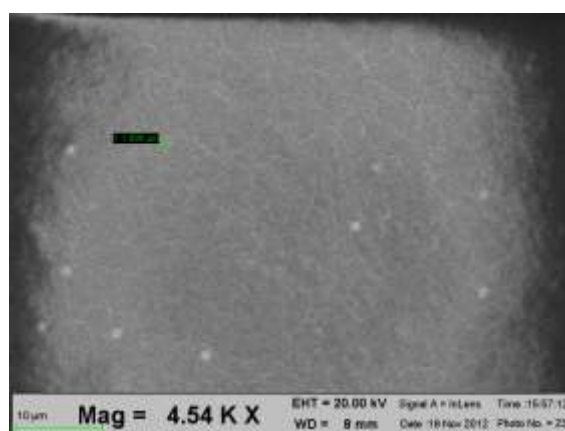
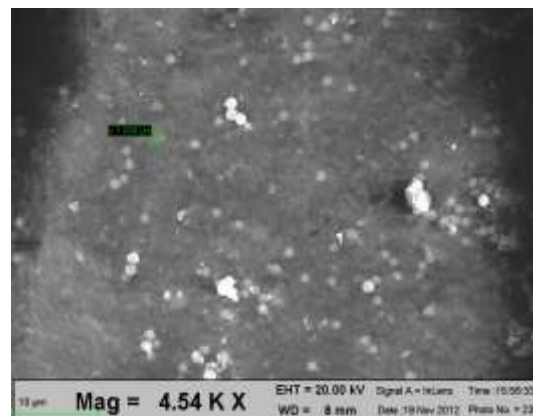


Punto A

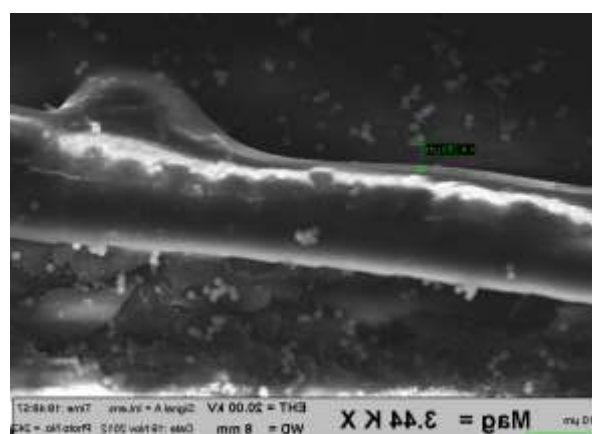
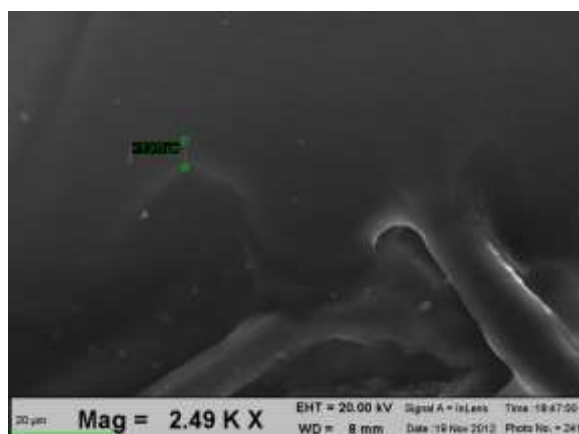


Punto B

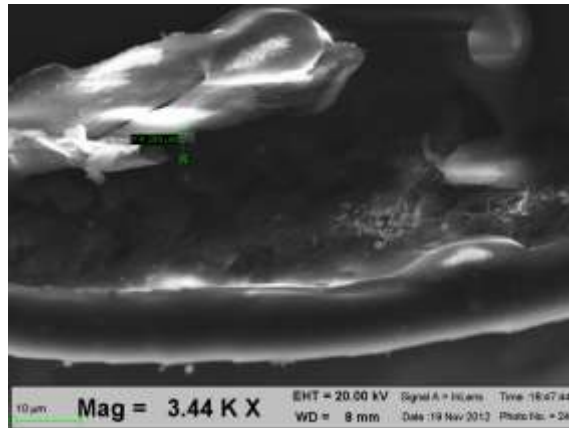
Direzione Y



Particelle 1.30 µm Cornice con lamella posta a 0.4 mm (lato sinistro) Direzione X

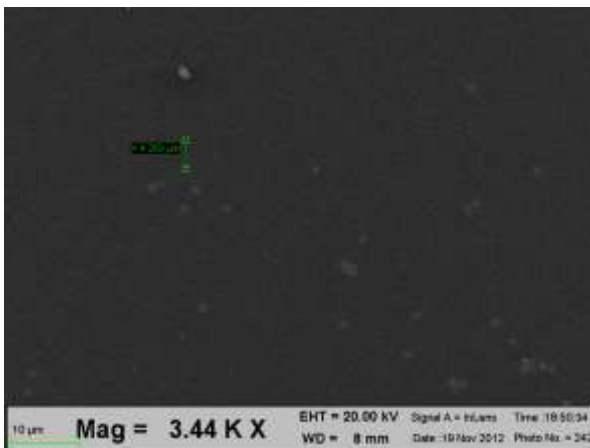
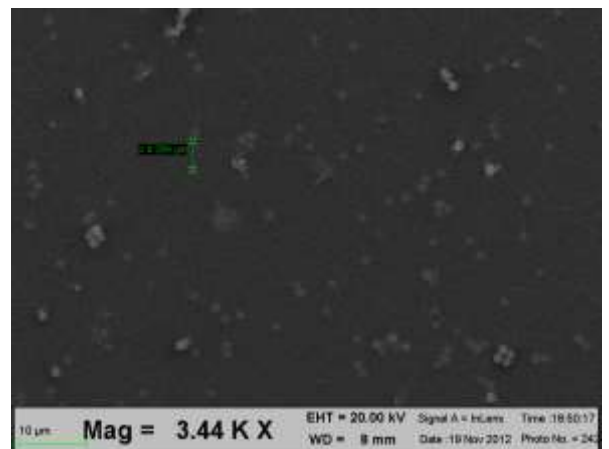
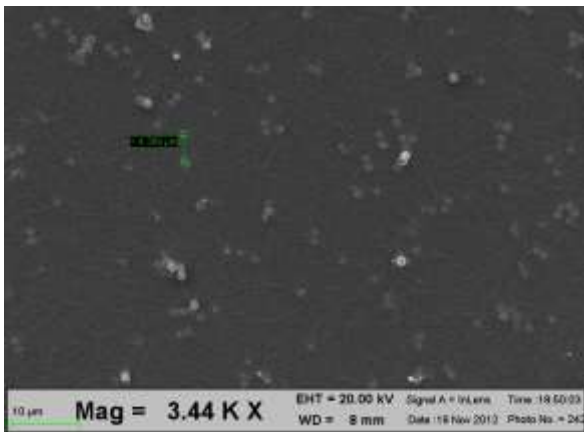


Punto A

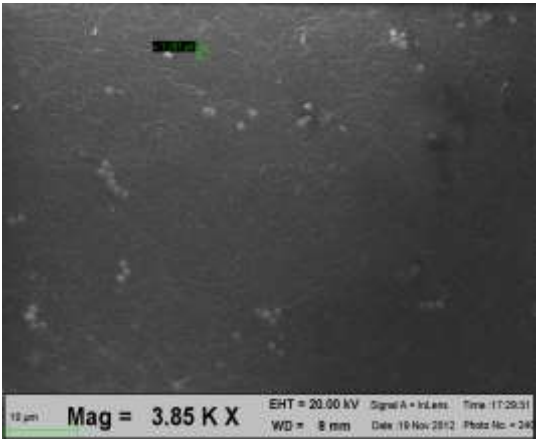
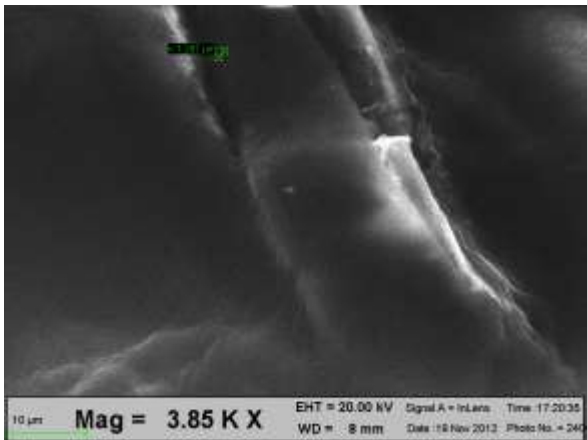


Punto B

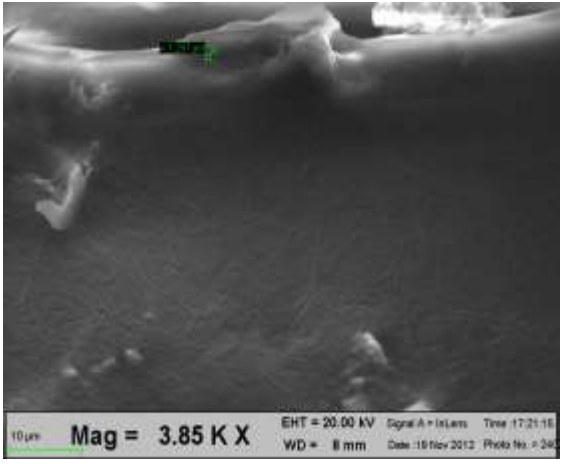
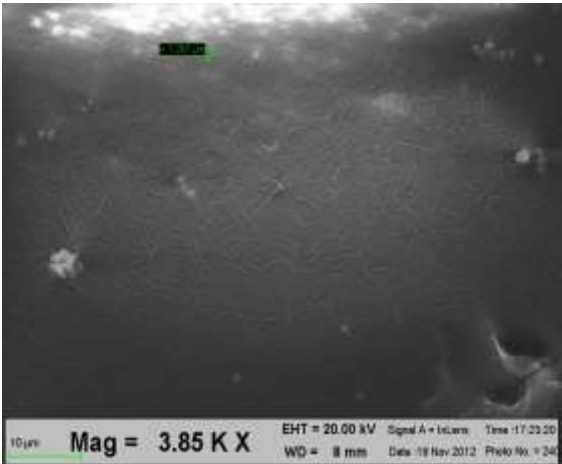
Direzione Y



Particelle 1.30 μm Cornice con lamella da 0.5 mm (lato destro) Direzione X

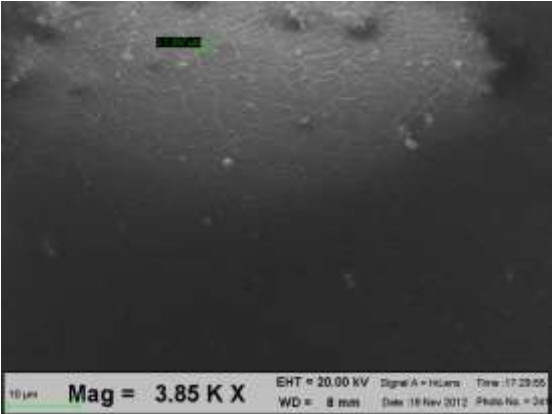


Punto A



Punto B

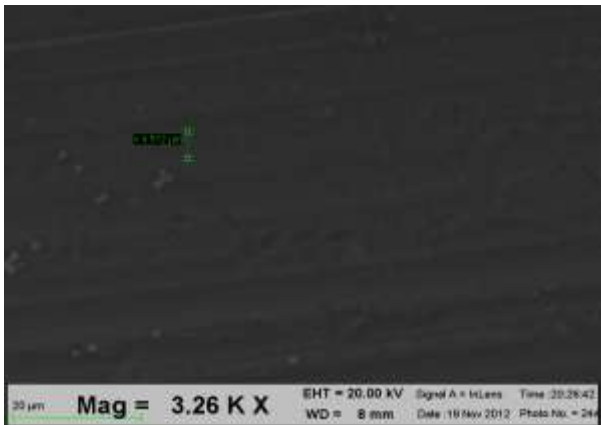
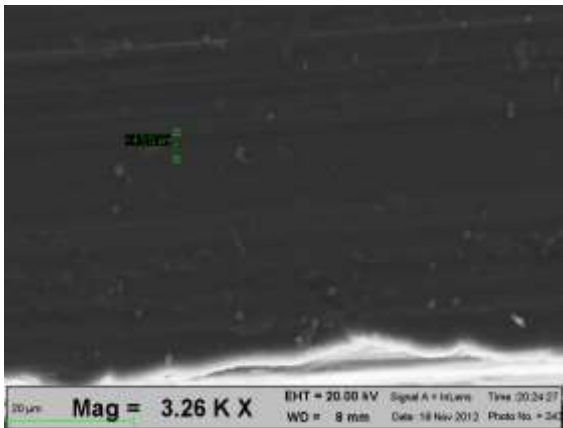
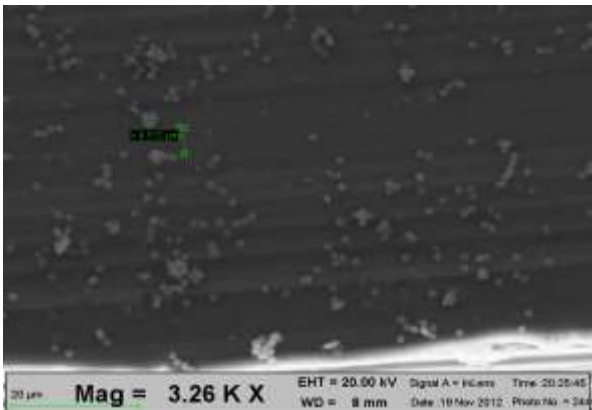
Direzione Y



Particelle 1.30 μm Cornice con lamella posta a 0.5 mm (lato sinistro) Direzione X Punto A

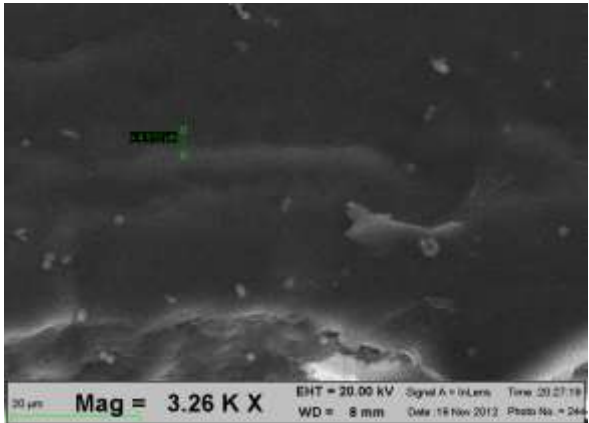


Punto A



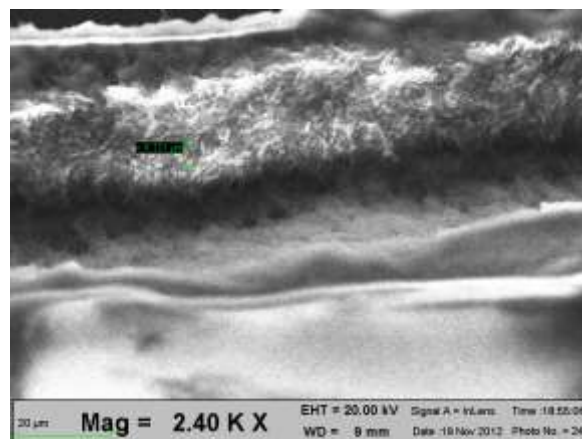
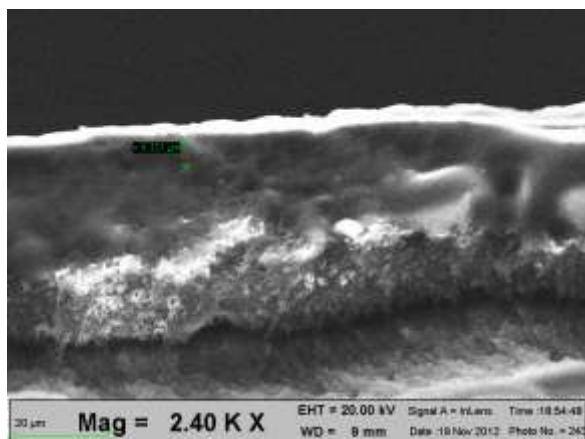
Punto B

Direzione Y

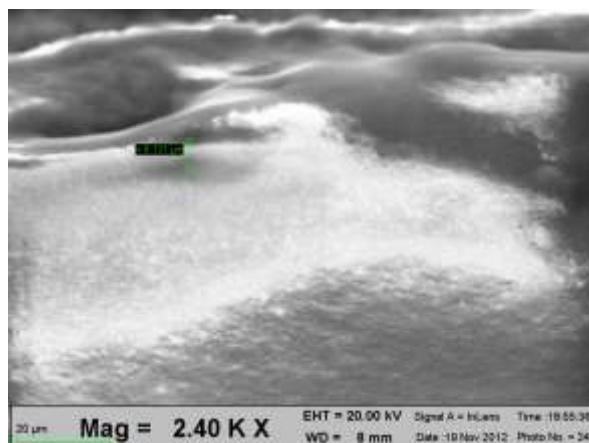




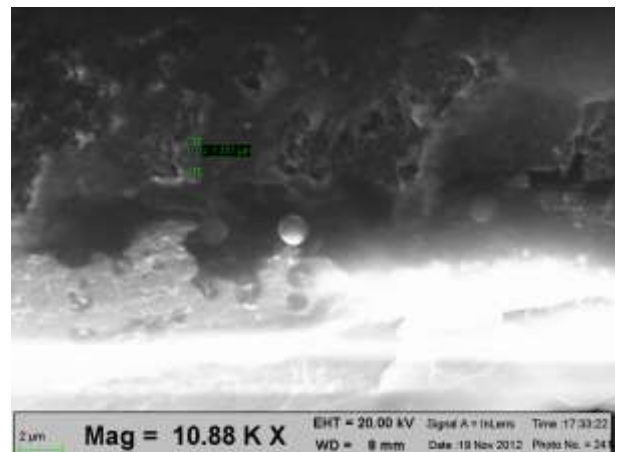
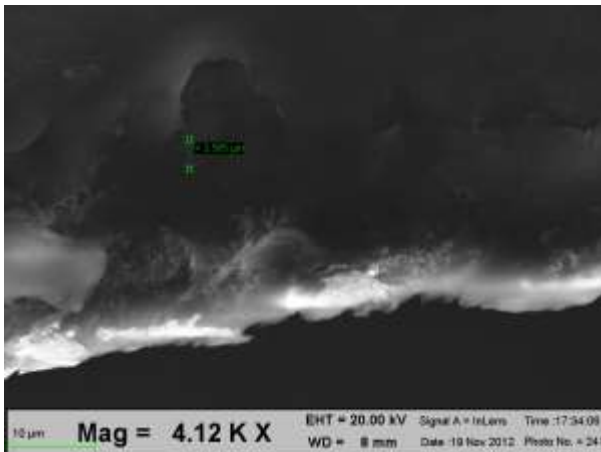
Particelle 1.30 μm Cornice con lamella posta a 0.6 mm (lato destro) Direzione X



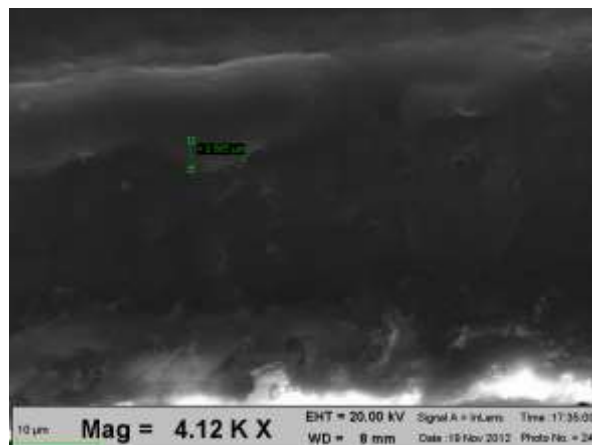
Direzione Y



Particelle 1.30 μm Cornice con lamella posta a 0.6 mm (lato sinistro) Direzione X



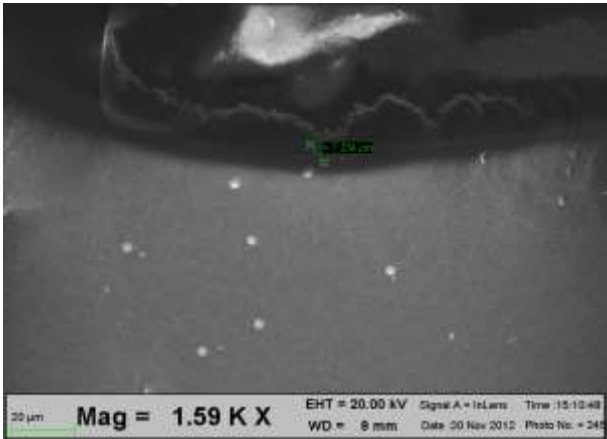
Direzione Y



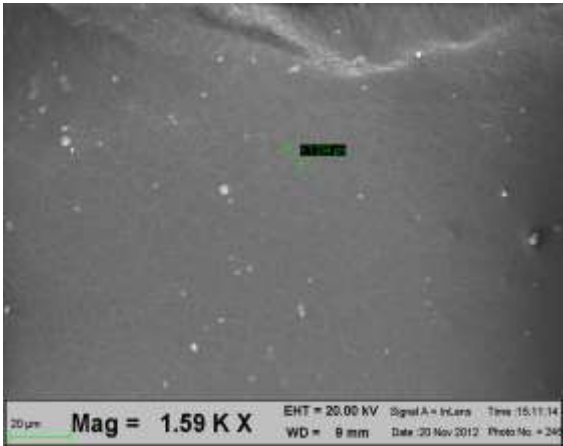
4.7 Analisi delle cornici per particelle di 2.867 μm di diametro.

La deviazione che subiscono le particelle con diametro di 2.867 μm è 0.4 mm. Le particelle sono state rilevate solo sulla cornice con lamella distante 0.4 mm dal centro del volume di campionamento. Sulle lamelle poste a 0.5 mm e 0.6 mm non sono state rilevate particelle depositate.

Particelle 2.867 μm Cornice con lamella posta a 0.4 mm (lato destro) Direzione X

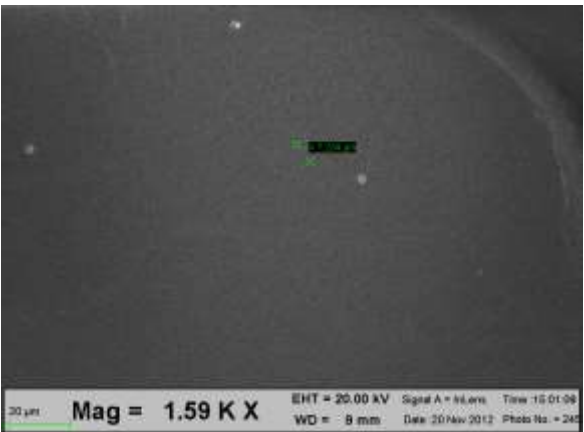


Punto A

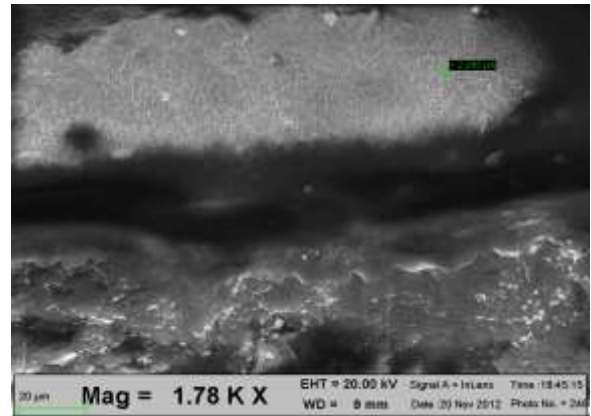
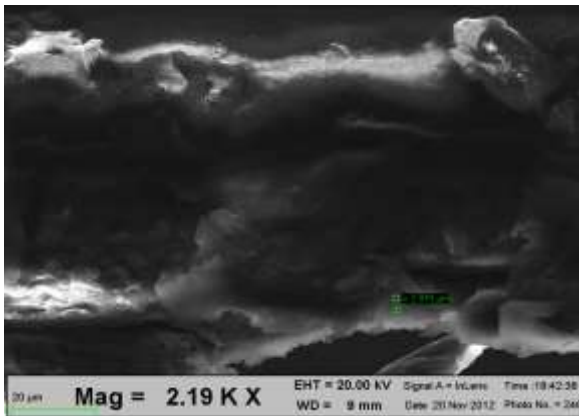


Punto B

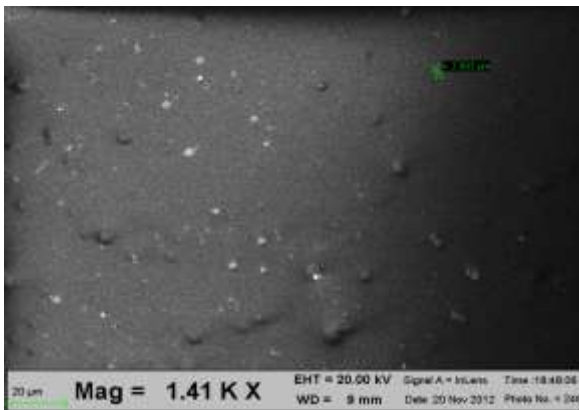
Direzione Y



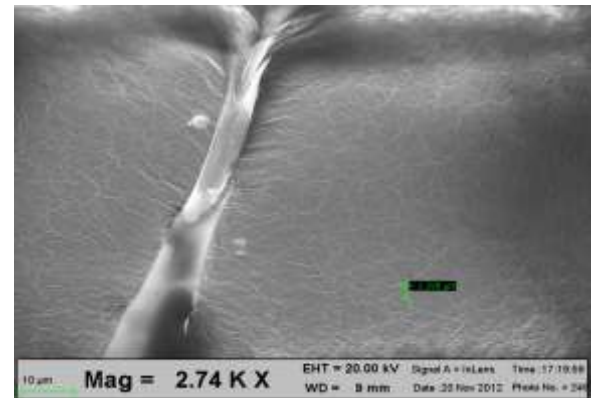
Particelle 2.867 μm Cornice con lamella posta a 0.4 mm (lato sinistro) Direzione X



Punto A



Punto B



Direzione Y

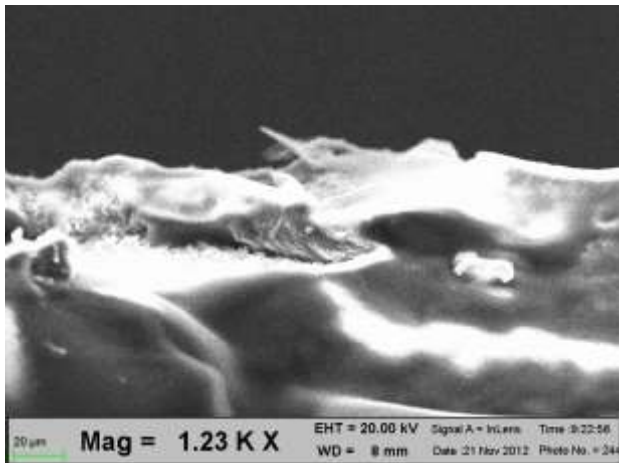
Le immagini relative alle lamelle poste a ± 0.5 mm e ± 0.6 mm non sono state inserite.

4.8 Analisi delle cornici per particelle di 4.32 μm di diametro

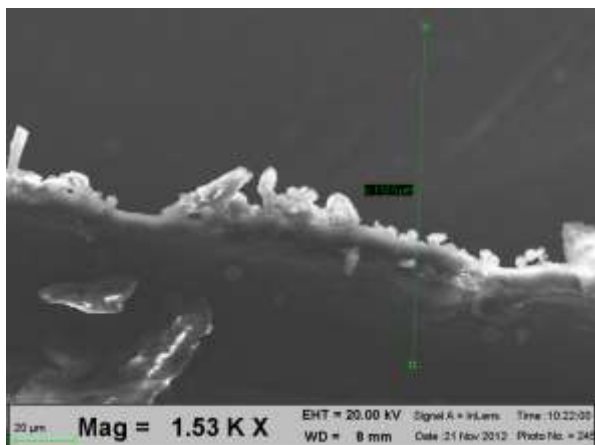
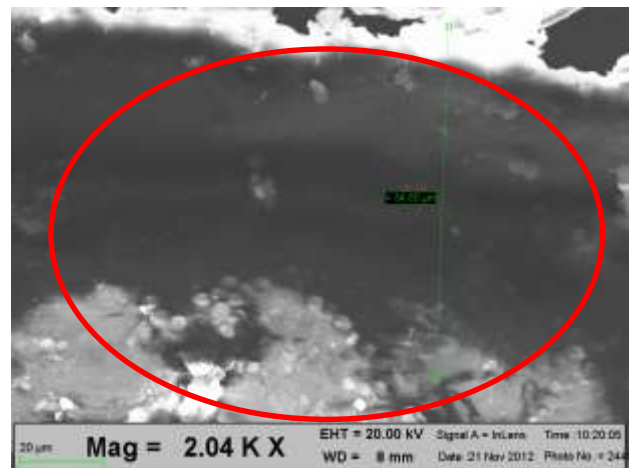
Le particelle con diametro di 4.32 μm si sono depositate sul bordo interno (ossia quello rivolto verso il centro del volume di campionamento), della lamella distante 0.4 mm rispetto al centro. Il numero di particelle riscontrato sulla lama è dell'ordine di poche decine di unità. Questo significa che la maggior parte delle particelle subisce una deviazione rispetto al centro del volume minore di 0.4 mm, confermando i risultati della simulazione fluidodinamica.

Non si sono depositate particelle sulle cornici con lamella distante 0.5 mm e 0.6 mm per cui le immagini relative non sono qui riportate.

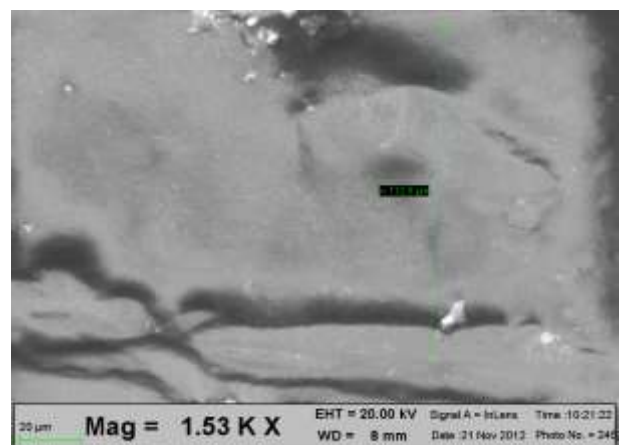
Particelle da 4.32 μm Cornice con lamella da 0.4 mm (lato destro) Direzione X



Punto A

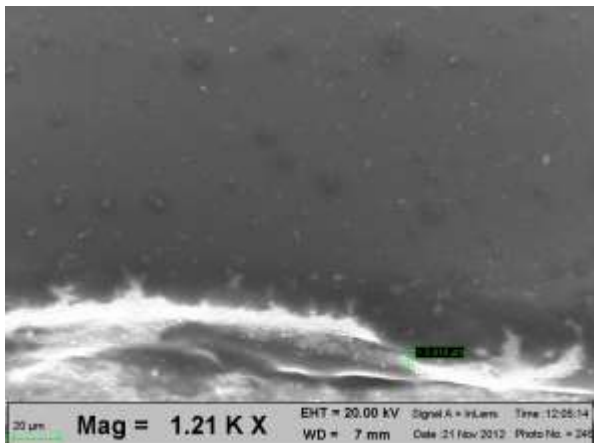


Punto B

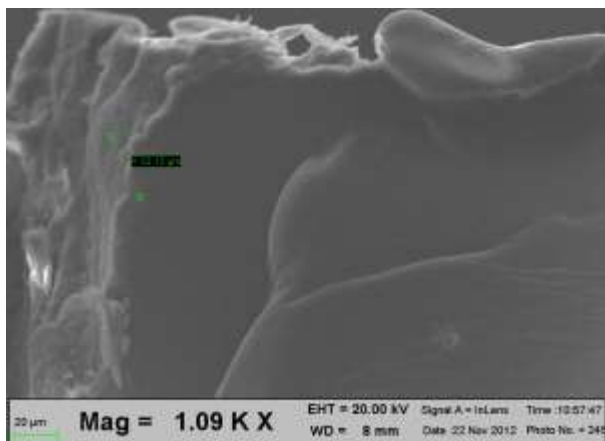
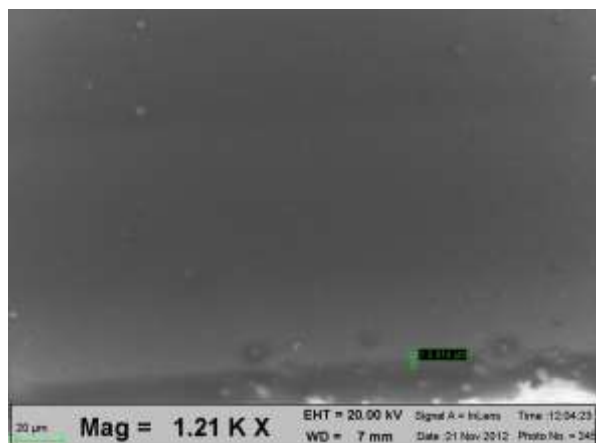


Direzione Y

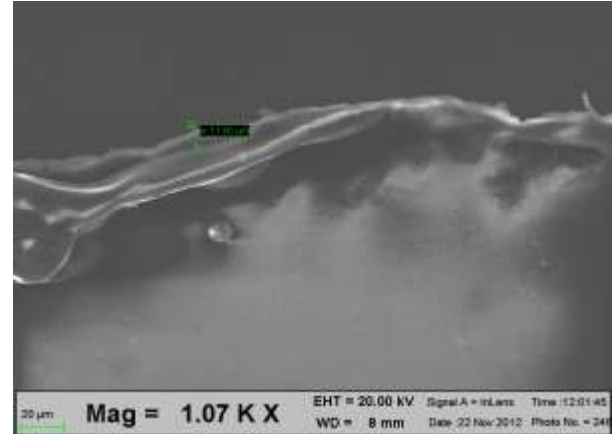
Particelle da 4.32 μm Cornice con lamella da 0.4 mm (lato sinistro) Direzione X



Punto A



Punto B

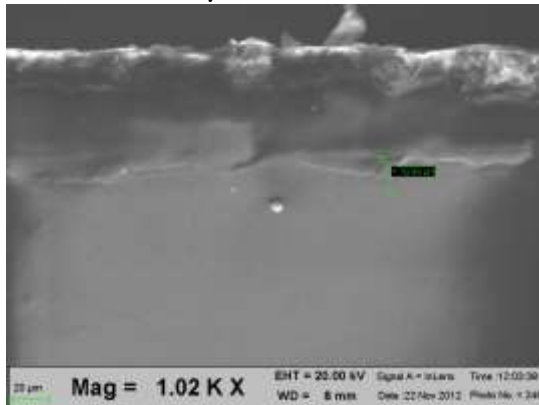


Direzione Y

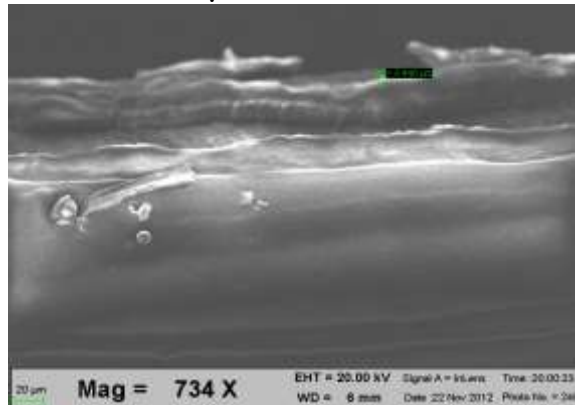
4.9 Analisi della cornice per particelle di 6.36, 8.43, 11 e 14.98 μm di diametro

In questo paragrafo sono riportati i risultati dell'analisi relativi alle particelle di 6.36, 8.43, 11, 14.98 μm di diametro. Per ciascuna dimensione è stata osservata solo qualche particella sul bordo della lamella distante 0.4 mm rispetto al centro del volume di campionamento. Il risultato evidenzia che tutte le particelle subiscono una deviazione minore di 0.4 mm come previsto dai risultati delle simulazioni.

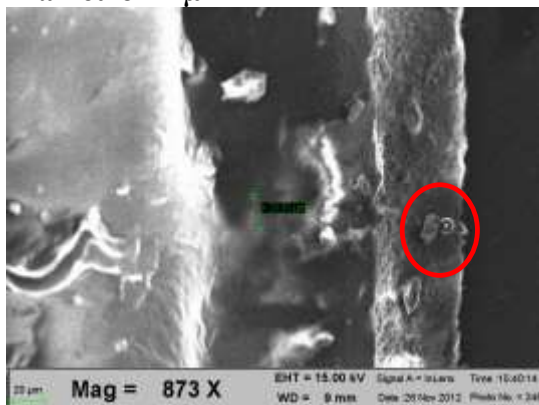
Diametro 6.36 μm



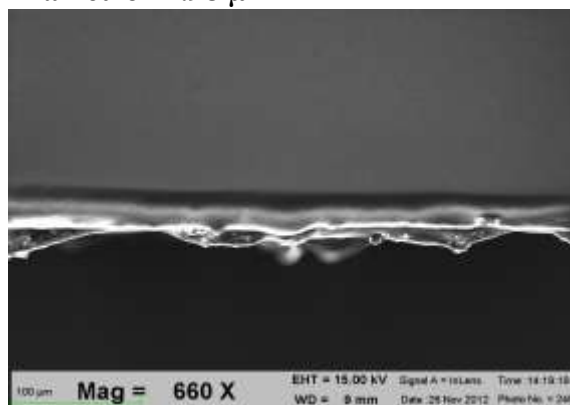
Diametro 8.43 μm



Diametro 11 μm



Diametro 14.98 μm



4.10 Conclusioni dell'analisi delle cornici

I risultati delle misure sperimentali hanno fornito importanti indicazioni sul comportamento del flusso di particelle all'interno MicroMED.

I risultati del primo test fluidodinamico (descritto nel paragrafo 4.3.1) confermano l'assenza di moti turbolenti all'interno del sistema ottico di MicroMED, così come previsto dalle simulazioni effettuate in ambiente Fluent.

Anche i risultati della seconda misura (par. 4.3.2) sono perfettamente in accordo con quelli ottenuti con le simulazioni: la deviazione della traiettoria delle particelle rispetto al moto centrale del flusso diminuisce all'aumentare del raggio delle particelle. Infatti dai risultati della misura si evince che la deviazione massima subita dalle particelle di 0.5 μm diametro è di 0.5 mm e la deviazione subita dalle particelle di diametro maggiore è minore di 0.4 mm. Al fine di poter rivelare tutte le particelle aspirate dallo strumento nell'intervallo dimensionale 0.4-20 μm , è necessario quindi prevedere un volume di campionamento di raggio ≥ 0.5 mm.

5. Sistema Ottico e misure dei parametri del volume di campionamento

5.1 Sistema Ottico

MicroMED deve fornire la misura della dimensione delle particelle che vengono aspirate al suo interno. Questa viene ottenuta a partire dall'intensità della luce diffusa in seguito all'irraggiamento subito dalle particelle durante l'attraversamento del volume di campionamento. Tale volume è generato dal sistema ottico e le sue caratteristiche (forma, dimensione e densità energetica) influiscono sulle dimensioni dell'intervallo dimensionale delle particelle che il sensore può rilevare.

I requisiti scientifici impongono per MicroMED un intervallo dimensionale compreso tra 0.4 – 20 μm , (lo stesso intervallo di misura di MEDUSA). Per ottenere le stesse prestazioni del sistema ottico di MEDUSA, che generava un volume di campionamento di dimensioni 3 x 1.2 x 0.32 mm^3 utilizzando un laser di 1.4 Watt di potenza ottica, è stato necessario disegnare un sistema ottico capace di focalizzare la luce di un laser di minor potenza (circa 10 volte inferiore) in un spot di dimensioni molto inferiori rispetto a quello di MEDUSA, in modo che la densità energetica dei due volumi di campionamento fosse paragonabile.

Il sistema ottico di MicroMED (capitolo 3.3.2) è costituito da una sorgente luminosa, due sistemi di lenti, uno specchio, una trappola di luce e una fibra ottica. Il sistema ottico ha il compito di generare un volume di campionamento centrato sull'asse dei condotti di aspirazione nel punto centrale tra il foro di uscita dell'inlet e l'ingresso dell'outlet.

Il volume di campionamento deve avere le seguenti caratteristiche: una forma regolare, una densità energetica sufficiente per poter rivelare la particella con la dimensione minima imposta dai requisiti scientifici e dimensioni compatibili con le deviazioni che subiscono le particelle in modo da poterle rivelare.

Il volume di campionamento è generato da un diodo laser di potenza ottica pari a 100 mW e lunghezza d'onda di 850 nm. La luce del laser è raccolta dal sistema di lenti numero 1 mostrato in figura 5.1, costituito da due lenti asferiche che focalizzano la luce del laser sulla fibra ottica.

La luce uscente dalla fibra è raccolta dal sistema di lenti numero 2 (figura 5.2), il quale concentra la luce del laser in un punto all'interno di MicroMED. La densità energetica, la forma e la dimensione del volume di campionamento dipendono dalle lenti interne al sistema numero 2. Esso è costituito da una lente sferica ed una cilindrica.

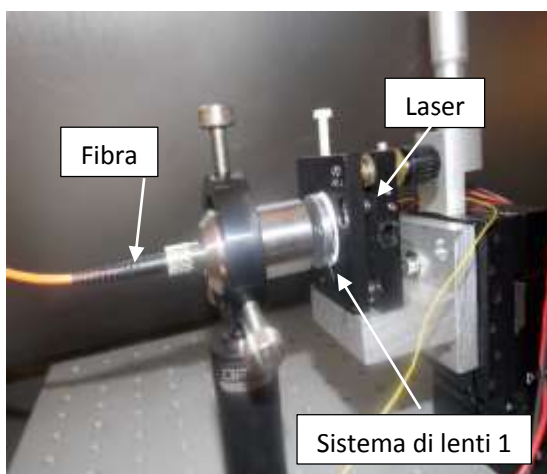


Figura 5.1: Laser, Fibra e Sistema di lenti 1



Figura 5.2: Sistema di lenti 2

La fibra ottica multimodale, che collega i due sistemi di lenti ha un core di 27 μm ed un cladding di 125 μm . L'apertura numerica della fibra è di 0.22. L'apertura numerica definisce l'angolo massimo di accettazione della luce, per cui un raggio luminoso nella fibra si propaga per riflessione totale fino all'estremo opposto. La relazione che esprime l'angolo massimo di accettazione è fornita dall'equazione 5.1:

$$\theta_{max} = \arccos(\text{NA}) \quad (5.1)$$

5.2 Caratterizzazione del volume di campionamento

La caratterizzazione del volume di campionamento implica la determinazione della, forma, della dimensione e della potenza ottica. Per conoscere queste proprietà sono state eseguite le seguenti misure :

1. Determinazione allineamento Laser-Sistema di lenti 1
2. Misura della Forma e della Dimensione
3. Misura della potenza ottica all'interno del volume di campionamento

L'apparato sperimentale utilizzato per eseguire i test sul sistema ottico è costituito da un movimentatore micrometrico, un laser-cam per determinare forma e dimensione ed un power meter per la misura della potenza ottica nel volume di campionamento.

Il set-up sperimentale è mostrato in figura 5.3.

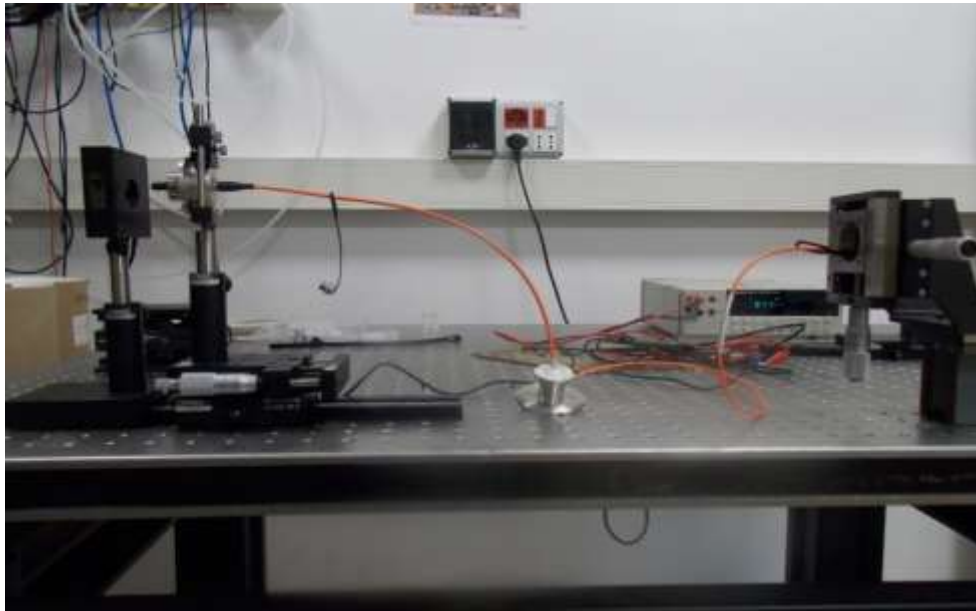


Figura 5.3: Apparato sperimentale utilizzato per i test sul sistema ottico

5.3 Misura allineamento Laser – Sistema di lenti 1

La posizione del laser rispetto al sistema di lenti 1 deve essere ottimizzata (allineamento) per ridurre la perdita della luce che entra nello strumento.

L'allineamento è stato eseguito utilizzando l'apparato sperimentale mostrato in figura 5.3. E' stata dunque determinata la posizione relativa del laser rispetto al sistema di lenti che massimizzasse l'intensità della radiazione in uscita dalla fibra.

Tale misura è stata eseguita fissando la posizione del sistema di lenti 1 ed installando il laser su un movimentatore micrometrico x,y,z in modo da determinarne la distanza e posizione lungo i tre assi rispetto al sistema di lenti.

Al sistema di lenti 1 è connessa la fibra ottica, la quale ha un estremo diretto verso il sensore Laser-Cam. Il Laser-Cam misura il profilo e l'intensità della luce in uscita dalla fibra.

La luce uscente dalla fibra varia a seconda della posizione del laser rispetto al sistema di lenti 1.

La corrispondenza tra la posizione del laser e l'immagine con maggior intensità di luce, fornita dal Laser-Cam, definisce la posizione ottimale del laser.

Nelle figure 5.4 e 5.5 sono mostrate le immagini relative all'intensità della luce uscente dalla fibra prima e dopo l'allineamento.

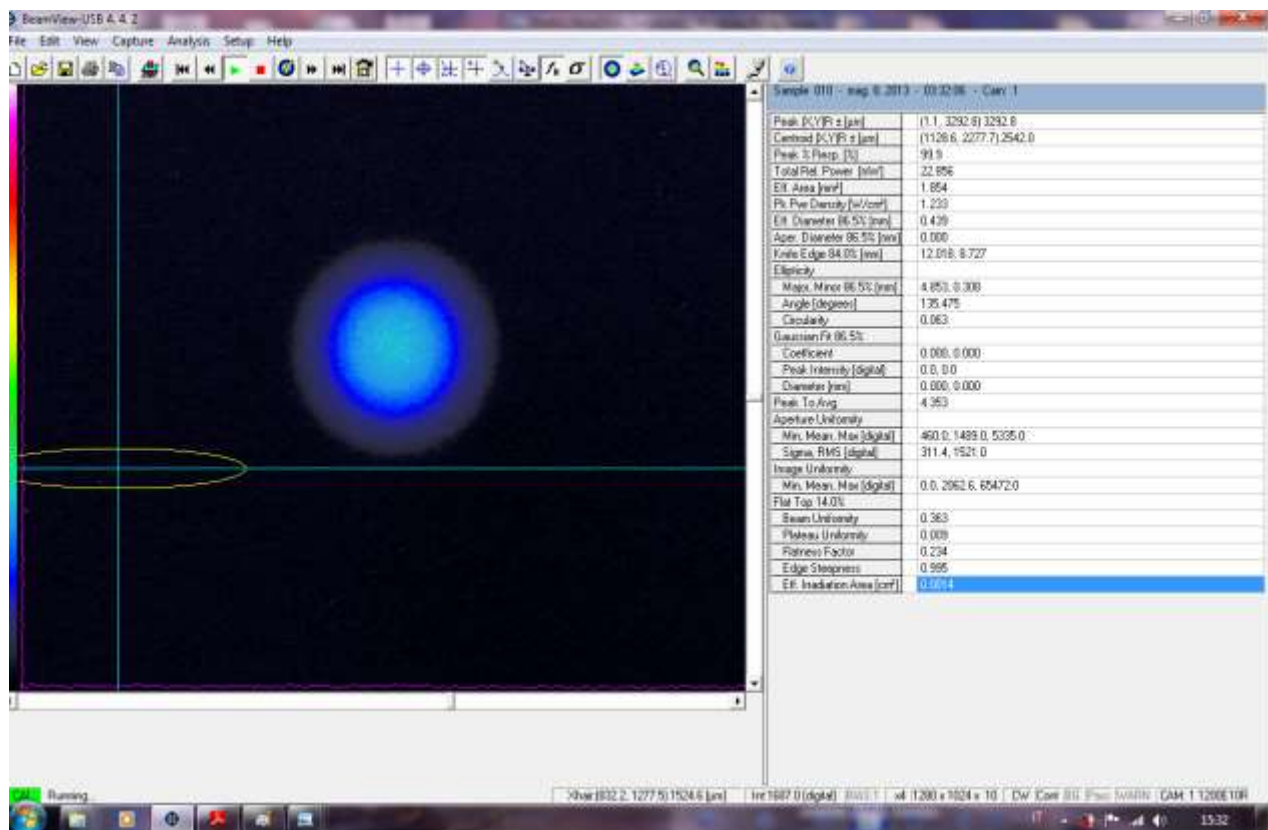


Figura 5.4: Immagine della luce uscente dalla fibra prima dell'allineamento del laser con il sistema di lenti 1

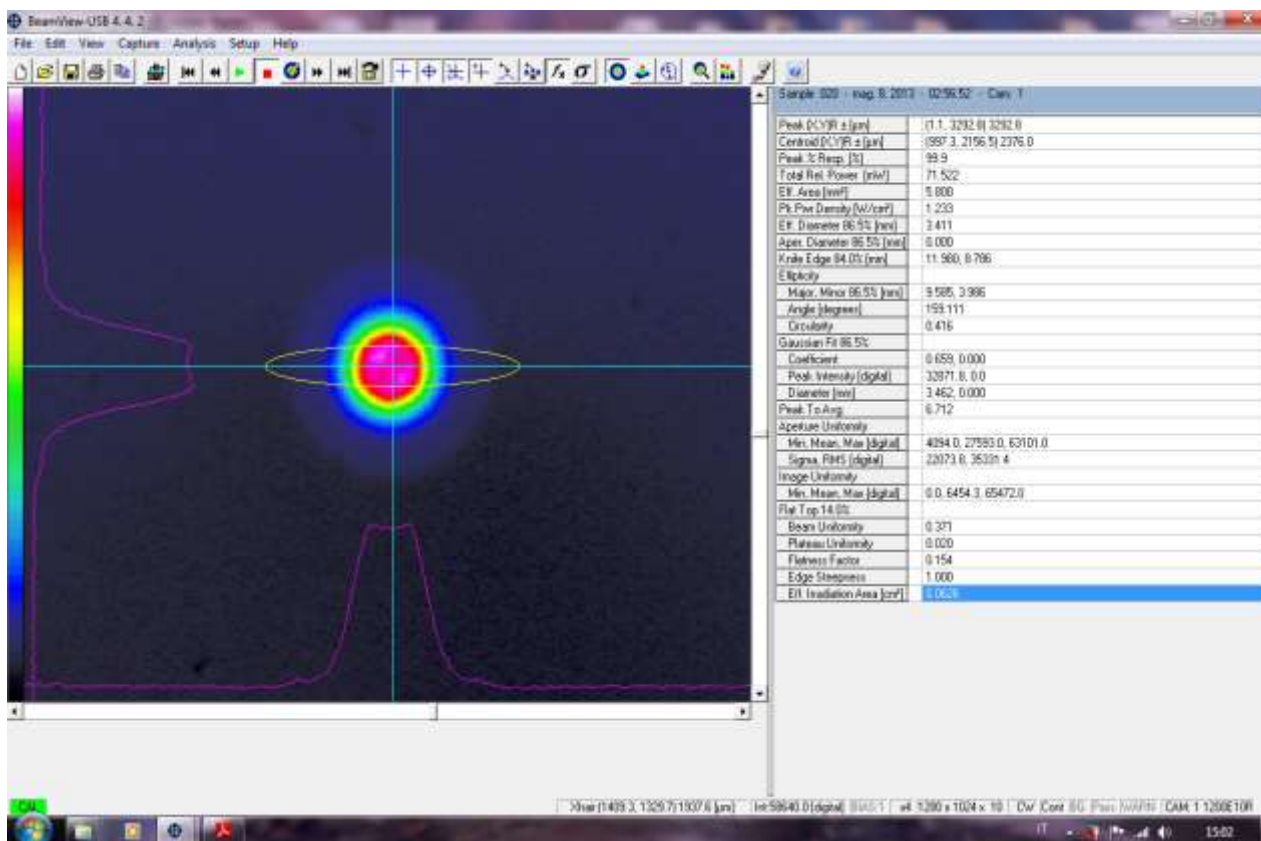


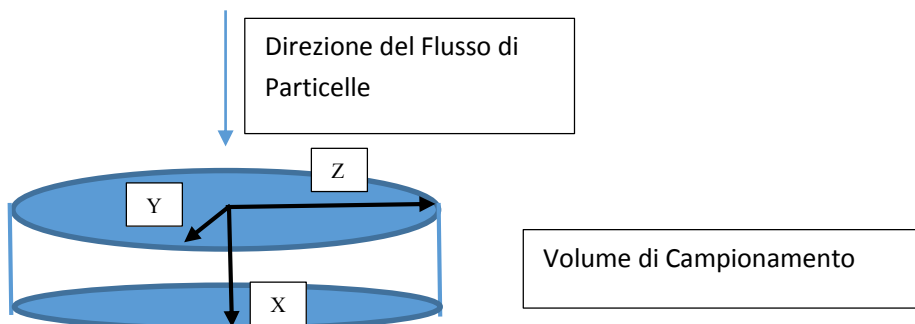
Figura 5.5: Immagine della luce uscente dalla fibra con laser e sistema di lenti 1 allineati.

Dall'immagine mostrata in figura 5.4 si evince che il profilo della luce uscente dalla fibra presenta un'intensità quasi uniforme e molto bassa rispetto all'immagine in figura 5.5. L'immagine 5.5 ottenuta dopo l'allineamento, presenta un profilo della luce uscente dalla fibra gaussiano e di alta intensità. La distanza ottimizzata tra il laser e il sistema di lenti 1 è 4 mm.

5.4 Misura della Forma e Dimensione del Volume di Campionamento

Eseguito l'allineamento tra il sistema di lenti 1 e il laser si è proseguiti nel misurare la dimensione del volume di campionamento, la forma e la distribuzione della luce al suo interno.

Il volume di campionamento è una regione tridimensionale generata da un fascio laser.



Conoscere le tre dimensioni che costituiscono il volume di campionamento è di fondamentale importanza. Ciascuna dimensione è relazionata ad un parametro diverso. Indicheremo con X la

direzione parallela al moto delle particelle, con Y indichiamo quella perpendicolare al moto delle particelle e perpendicolare al fascio laser, con Z la direzione lungo il fascio laser e perpendicolare al moto delle particelle.

La dimensione lungo la direzione X rappresenta lo spessore del fascio di luce attraversato dalle particelle aspirate da MicroMED. Al variare dello spessore attraversato varia la durata temporale del segnale uscente dal fotodiodo (che raccoglie la radiazione diffusa dalle particelle). Misurando la durata del segnale e lo spessore attraversato si ricava una stima della velocità delle particelle nell'attraversare il volume di campionamento.

Le dimensioni lungo Y e Z rappresentano la larghezza e la lunghezza del volume. La larghezza e la lunghezza devono essere compatibili con la deviazione massima che subiscono le particelle, (parametro misurato con i test fluido dinamici) affinché tutte le particelle in transito siano rivelate.

La misura della dimensione e della distribuzione di luce nel volume di campionamento è stata eseguita utilizzando il set-up sperimentale mostrato in figura 5.3.

Con il Laser-Cam è stata acquisita una serie di immagini della sezione del volume di campionamento, muovendosi lungo l'asse Z per 1 mm (dimensione in Z del vol. di campionamento) con passo di 100 μm . L'obiettivo è verificare che la forma, la dimensione e in special modo la distribuzione di luce nel volume di campionamento siano costanti lungo l'asse Z.

Le sezioni sono state misurate a partire dal punto 0 (fuoco del fascio luminoso), muovendosi con un passo di 100 μm nel verso concorde e in quello discorde all'emissione del laser, acquisendo 10 immagini delle sezioni del volume di campionamento.

In figura 5.6 è riportato il risultato dell'acquisizione della sezione del volume di campionamento nel punto 0.

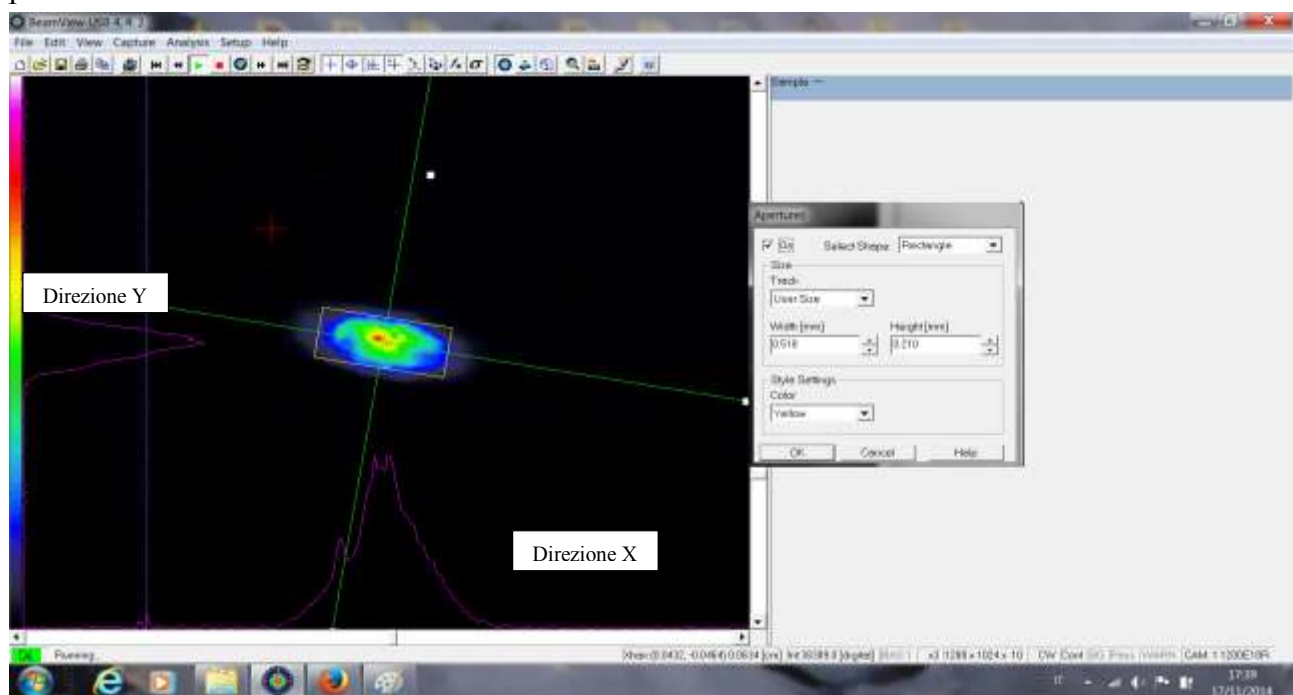
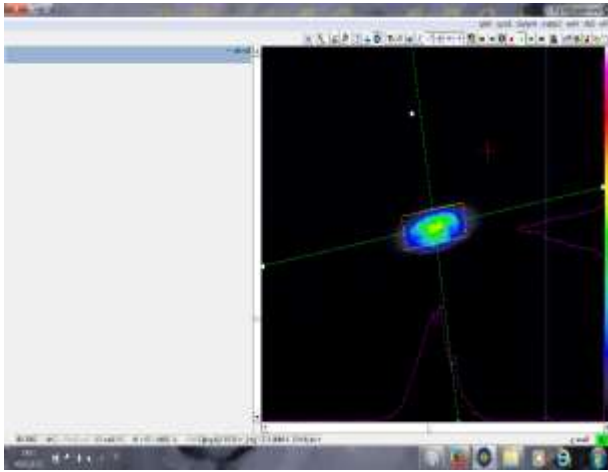


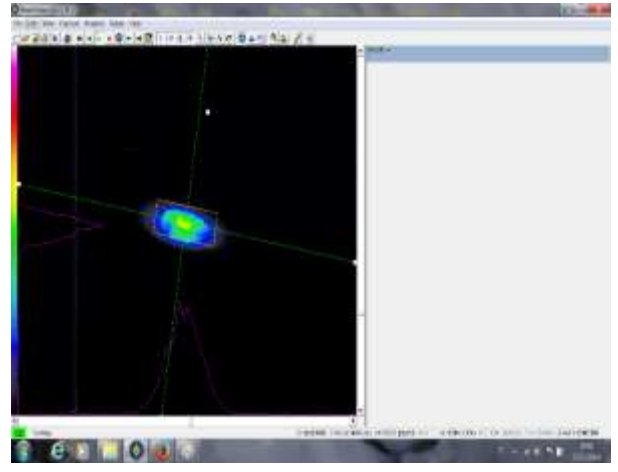
Figura 5.6: Sezione del volume di campionamento nel punto 0.

Come mostrato in figura 5.6, la luce non è distribuita uniformemente all'interno della sezione, ma la forma è ellittica e quindi regolare. Il volume di campionamento ha l'asse minore che misura 210 μm e l'asse maggiore di 518 μm . In figura 5.7 sono riportate le sezioni del volume di campionamento

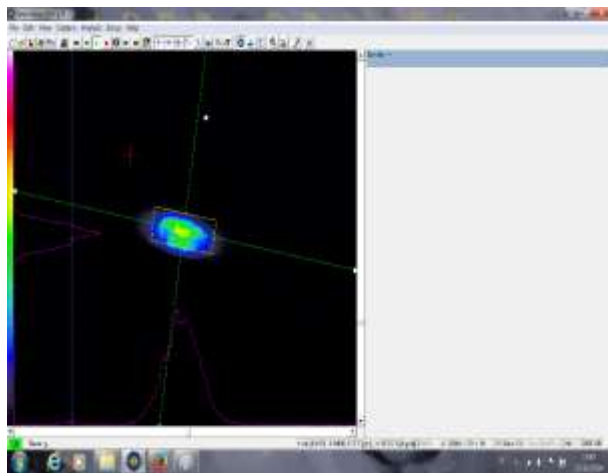
acquisite rispettivamente a 100 μm , 200 μm , 300 μm , 400 μm e 500 μm dal punto 0 nel verso concorde all'emissione del fascio laser. In queste immagini si osserva che allontanandosi dal punto zero, la forma e la dimensione del fascio di luce rimane invariata. Rimane invariata anche la distribuzione della luce all'interno del volume.



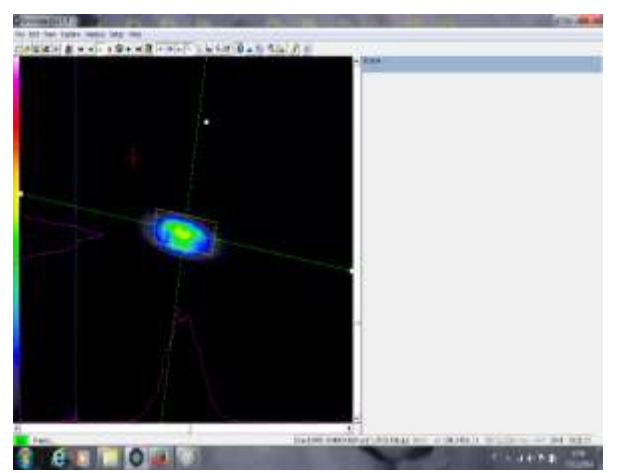
(a)



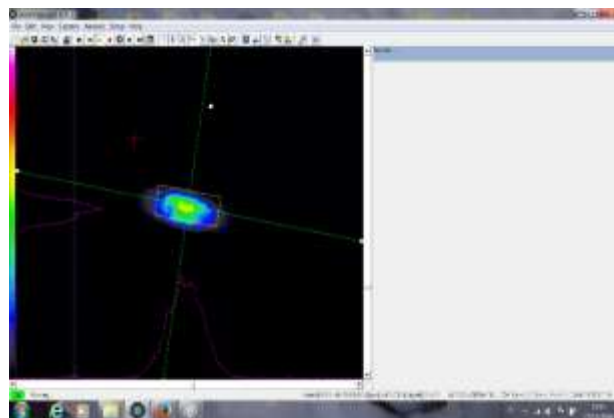
(b)



(c)



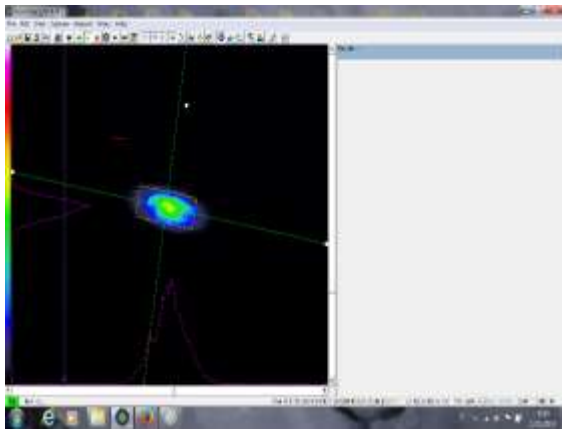
(d)



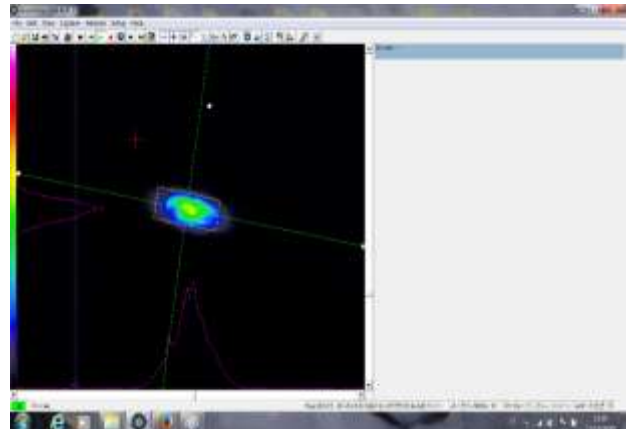
(e)

Figura 5.7: Sezioni del volume di campionamento effettuati con passo di 100 μm nel verso concorde alla propagazione del laser : figura (a) 100 μm , figura (b) 200 μm , figura (c) 300 μm , figura (d) 400 μm , figura (e) 500 μm .

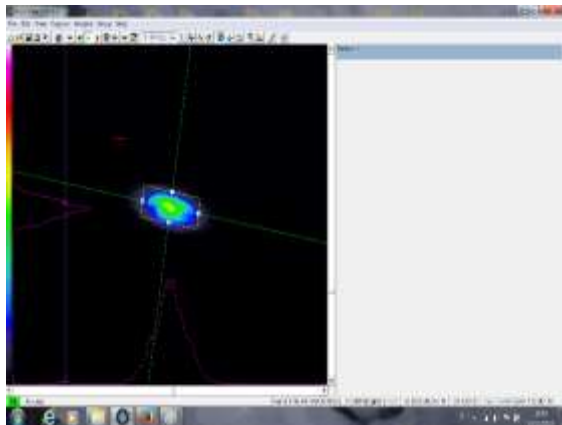
Nella figura 5.8 sono rappresentati le sezioni del volume di campionamento acquisite rispettivamente a $-100\text{ }\mu\text{m}$, $-200\text{ }\mu\text{m}$, $-300\text{ }\mu\text{m}$, $-400\text{ }\mu\text{m}$ e $-500\text{ }\mu\text{m}$ dal punto 0 (cioè nel verso discorde all'emissione del fascio laser). La forma, dimensione e distribuzione della luce restano invariate.



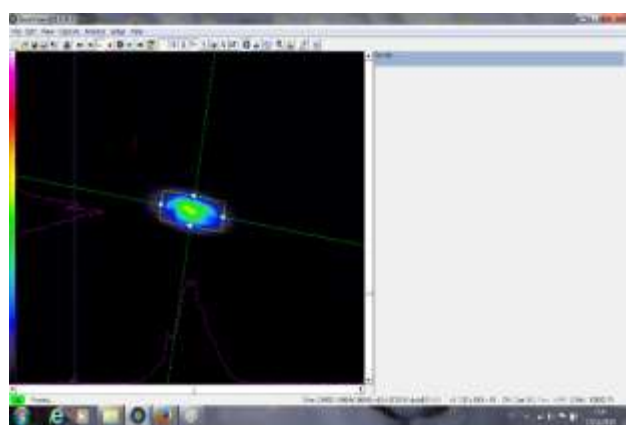
(a)



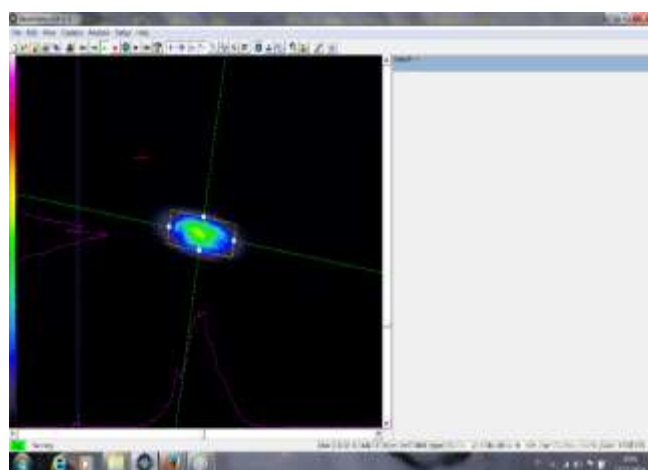
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 5.8: Sezioni del volume di campionamento effettuati con passo di $100\text{ }\mu\text{m}$ nel verso opposto alla propagazione del laser: figura (a) $100\text{ }\mu\text{m}$, figura (b) $200\text{ }\mu\text{m}$, figura (c) $300\text{ }\mu\text{m}$, figura (d) $400\text{ }\mu\text{m}$, figura (e) $500\text{ }\mu\text{m}$.

Riassumendo in entrambi i versi lungo la direzione Z il volume di campionamento rimane costante in forma, dimensione e distribuzione della luce al suo interno.

5.5 Misura della potenza ottica nel volume di campionamento e valutazione delle prestazioni del sistema ottico

In questo paragrafo viene descritto un semplice modello radiometrico utilizzato per la valutazione delle prestazioni del sistema ottico.

Il modello richiede in ingresso il campo di vista dello specchio, le caratteristiche del volume di campionamento (forma, dimensione e potenza ottica), della particella rivelata dal sistema ottico (indice di rifrazione, dimensioni), della radiazione incidente (lunghezza d'onda) e del rivelatore (responsività).

La forma e la dimensione del volume di campionamento sono state determinate nella sezione 5.4.

La misura della potenza ottica è stata eseguita utilizzando il set-up sperimentale di figura 5.3 sostituendo il Laser-Cam con il Power Meter. Il Power Meter è un sensore che fornisce una misura diretta della potenza ottica di un fascio laser.

La potenza ottica del volume di campionamento misurata è di 74.5 mW. Considerando che la potenza ottica del laser è di 100 mW, è possibile fare una stima delle luce persa a causa delle connessioni, della fibra e delle lenti: la perdita è circa il 26 % della luce emessa dal laser.

La densità ottica Δ incidente su una particella nel volume di campionamento è $\Delta = P_{\text{ottica}}/A$ dove A è la sezione del volume di campionamento ortogonale alla direzione del fascio di luce laser.

Come evidenziato nel paragrafo 5.4, A presenta una forma ellittica e gli assi misurano rispettivamente 518 μm asse maggiore e 210 μm asse minore.

A è l'area dell'ellisse:

$$A = \frac{a}{2} \cdot \frac{b}{2} \cdot \pi$$

con a e b che rappresentano gli assi dell'ellisse.

$$\Delta = 0.872 \text{ W/mm}^2.$$

Nel modello utilizzato si considera una particella sferica ed omogenea posta al centro del volume di campionamento (diffusione di Mie), la cui dimensione d varia nell'intervallo 0.4-20 μm e con indice di rifrazione pari a $n = 1.59$ e $k = 0$.

Lo specchio è posizionato a 90° rispetto alla direzione del fascio laser e raccoglie la luce diffusa dalle particelle in un angolo compreso tra 25° e 155° .

La responsività del rivelatore è di 0.55 A/W. La lunghezza d'onda del laser è 850 nm.

Utilizzando la teoria di Mie, si calcola la potenza della luce totale diffusa dalla particella (P_s) attraverso la relazione:

$$P_s = \Delta \cdot Q_s(\lambda, n, d) \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4} \quad (5.4)$$

con Q_s efficienza di scattering la cui espressione è data dall'equazione 2.12. La potenza ottica raccolta dallo specchio e trasferita sul rivelatore è data da:

$$P_{s,25^\circ,155^\circ} = 2\pi^2 \frac{d^2}{4} \Delta \cdot Q_s \int_{25}^{155} L(\theta) \sin\theta d\theta \quad (5.5)$$

dove $L(\theta)$ è la funzione di fase :

$$2\pi \int_0^\pi L(\theta) \sin(\theta) d\theta = 1 \quad (5.6)$$

Dalle equazioni 5.5 e 5.6 si stima la corrente teorica in uscita dal fotodiode proporzionale alla luce diffusa dalla particella:

$$I_s = \mathcal{R}(\lambda) \cdot P_{s,25^\circ,155^\circ} \quad (5.7)$$

con $\mathcal{R}(\lambda)$ responsività del rivelatore.

In figura 5.9 è rappresentato il risultato della simulazione. Sull'asse delle ascisse è riportato il raggio delle particelle. L'asse delle ordinate rappresenta i valori della corrente teorica I_s , espressa dall'equazione 5.7. La linea rossa rappresenta il rumore dell'elettronica pari a 5 nA.

La curva in figura 5.9 esprime la risposta strumentale teorica di MicroMED, ovvero l'andamento del segnale teorico, prodotto dalla particella nell'attraversare il volume di campionamento di MicroMED, con la dimensione della particella stessa. La curva sarà confrontata in seguito con i dati sperimentali acquisiti da MicroMED. Dal risultato della simulazione emerge che lo strumento è in grado di rilevare particelle con raggio $> 0.2 \mu\text{m}$, così come imposto dai requisiti scientifici. Tali particelle infatti generano un segnale superiore al rumore dell'elettronica.

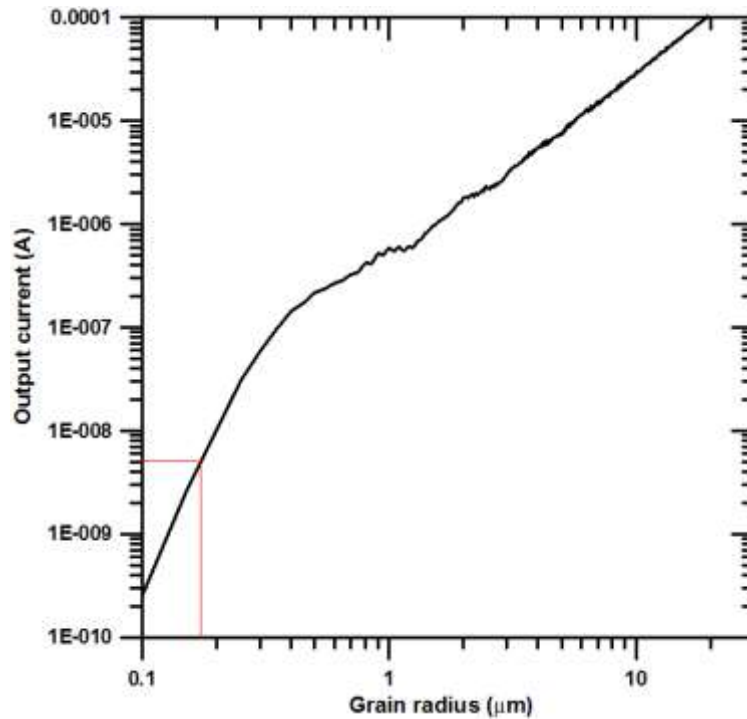


Figura 5.9: Risultato della simulazione basata sulla teoria di Mie eseguita considerando i parametri misurati del volume di campionamento.

6. Elettronica di prossimità ed EGSE

Le particelle nell'attraversare il volume di campionamento diffondono luce, la quale è convogliata per mezzo di uno specchio sul fotodiodo, che per effetto fotoelettrico, restituisce un segnale in corrente la cui ampiezza e durata dipendono dall'interazione particella-volume di campionamento.

Il segnale in corrente del fotodiodo è processato dall'elettronica di prossimità (PE), alloggiata internamente allo strumento e costituita da un amplificatore elettronico a transimpedenza che processa il segnale di corrente in uscita al fotodiodo, restituendo un segnale di tensione con dinamica di 10V.

I requisiti di progetto della PE sono stati l'ottenimento di un'elevata dinamica di uscita (circa sette decadi), per ottenere un altrettanto elevata dinamica di misura delle dimensioni delle particelle, e di una banda passante adeguata alla velocità di passaggio delle particelle nel volume di campionamento. In considerazione dell'applicazione dello strumento MicroMED in ambito spaziale, si è tenuto in conto durante il progetto del requisito di compatibilità dei componenti elettronici a tale ambiente di utilizzo e la necessità di ridurre i consumi elettrici.

La scheda è basata su due stadi di amplificazione lineari in cascata con guadagno di amplificazione pari rispettivamente a 10^5 V/A e 10^2 V/A. In tal modo si ottengono due uscite in tensione, dette Low and High Gain Output, con guadagni di 10^5 V/A e 10^7 V/A.

La PE è alimentata con due tensioni di +12V e -12V.

In figura 6.1 è riportata la scheda PE.

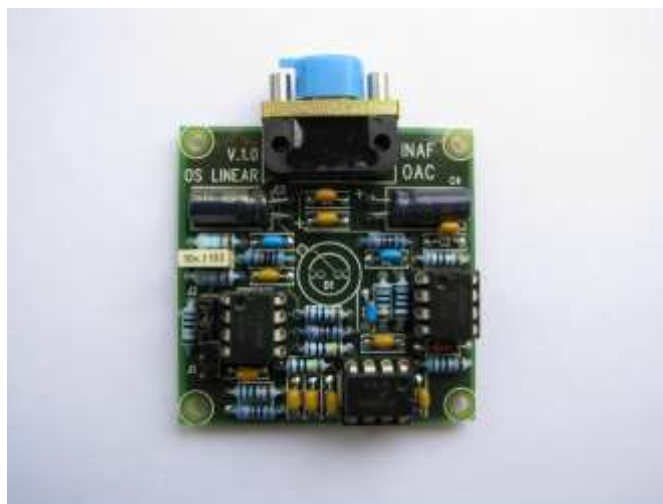


Figura 6.1: Scheda PE di amplificazione di MicroMED

La scheda è dotata di un ingresso per la compensazione dell'offset presente in uscita alla PE. Tale offset è dovuto a due componenti, la prima elettrica presente nello stesso Amplificatore Operazionale e una seconda di natura ottica, dovuta alla stray light presente nello strumento anche in assenza di particelle interferenti il raggio laser. Attraverso l'ingresso di compensazione dell'offset è possibile generare una corrente di compensazione nel nodo di ingresso dell'amplificatore che consente di riportare a zero la sua uscita in condizioni di assenza di segnale utile (dovuto alla presenza delle particelle nel volume di campionamento), massimizzando in tal modo la dinamica ottenibile.

Sono stati eseguiti dei test sulla scheda PE per verificare il sistema di amplificazione. Gli amplificatori hanno una dinamica tra 0-10 V e banda di 500 kHz.

Lo scopo dei test è stato quello di monitorare il segnale di output dei due canali Low-Gain e High Gain, al variare della frequenza del segnale d'ingresso.

6.1 Test su scheda PE

Le particelle aspirate da MicroMED, nell'attraversare i condotti inlet ed outlet subiscono un'accelerazione causata dalla variazione della sezione dei condotti e quindi della portata. La dimensione delle particelle e la portata sono i fattori principali che influenzano la velocità delle particelle.

La differente velocità posseduta dalle particelle incide sui tempi di attraversamento del volume di campionamento. La differente velocità influisce sulla durata temporale del segnale in uscita dal fotodiodo e processato dall'elettronica di prossimità. Il test ha avuto l'obiettivo di simulare le varie velocità che possiedono le particelle, con segnali di diversa frequenza, e studiare il comportamento dello stadio di amplificazione analizzando l'output dei canali Low-Gain e High-Gain.

Per i test eseguiti sulla scheda è stato utilizzato il set-up sperimentale mostrato in figura 6.2 costituito da un generatore di segnale, un alimentatore +/- 12 Volt, un oscilloscopio digitale ed una gabbia di Faraday per schermare la scheda dal rumore elettromagnetico ambientale, migliorando così la qualità delle misure.

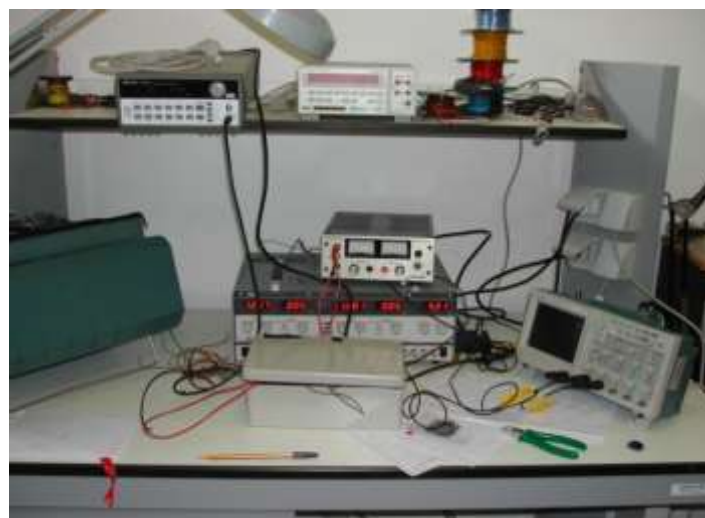
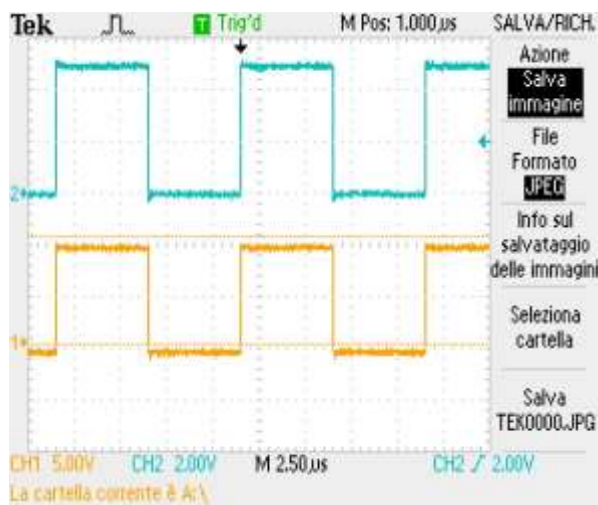


Figura 6.2: Apparato sperimentale per test su scheda PE.

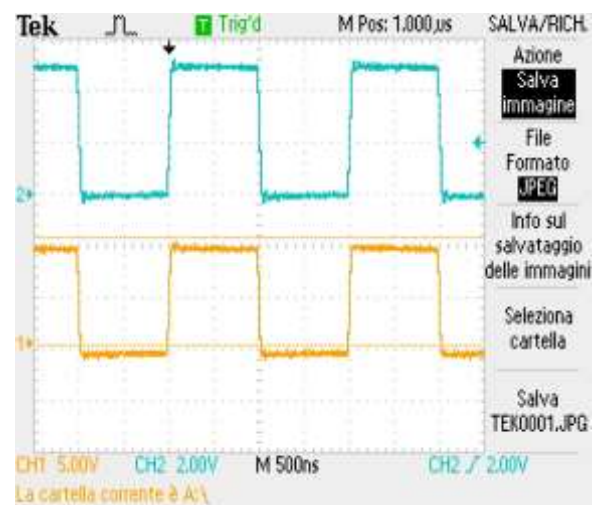
I segnali di output dei due canali di amplificazione Low-Gain e High-Gain sono stati acquisiti da un oscilloscopio digitale. La frequenza del segnale d'ingresso è controllata dal generatore di segnale. Il segnale d'ingresso della scheda PE ha un ampiezza di 0.05 mV, in tal modo il segnale di output amplificato dal canale Low-Gain risulta di 5V mentre il canale High-Gain risulta in saturazione. Questa condizione è valida per quasi tutte le dimensioni delle particelle $> 2 \mu\text{m}$ di diametro.

I risultati del test sono mostrati in figura 6.3. La curva blu corrisponde al segnale amplificato dal canale Low-Gain, la curva gialla corrisponde al segnale amplificato dal canale High-Gain che è nello stato di saturazione.

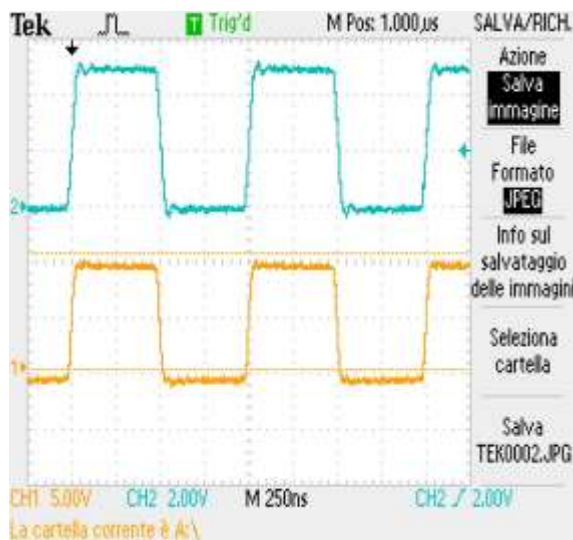
La frequenza del segnale d'ingresso varia tra da 100 KHz e 2MHz. Dall'immagine 6.3 si evince che il segnale amplificato da entrambi i canali non subisce distorsioni variando la frequenza del segnale d'ingresso fino a 2 MHz.



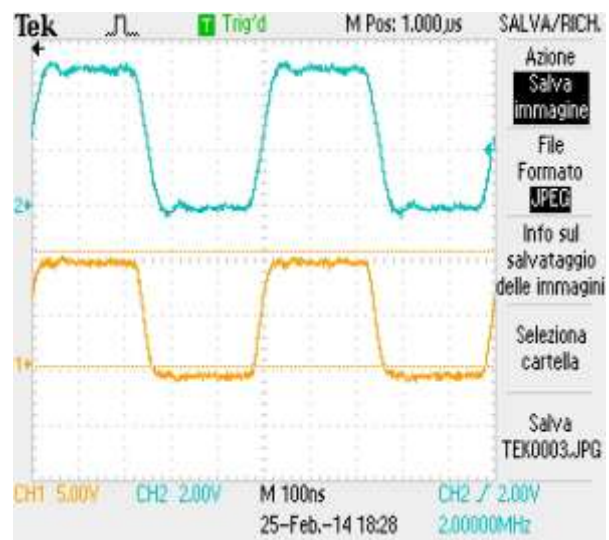
Frequenza di Pulsazione 100 KHz



Frequenza di Pulsazione 500 KHz



Frequenza di Pulsazione 1 MHz



Frequenza di Pulsazione 2 MHz

Figura 6.3: Risposta dei canali Low-Gain e High-Gain ottenuta variando la frequenza del segnale d'ingresso.

Un altro test significativo eseguito sulla scheda PE ha riguardato il canale di compensazione dell'offset. Il test è stato eseguito utilizzando il prototipo di MicroMED e fornendo all'ingresso di compensazione una tensione mediante un alimentatore lineare che consente di riportare a zero l'uscita della PE in assenza di segnale utile al suo ingresso.

Il risultato della misura è riportato in figura 6.4. Nel pannello (a) è riportato il risultato della misura offset dovuto alla stray-light, con un valore di circa 200mV. Nel pannello (b) è riportato il risultato della misura dell'offset compensato attraverso l'ingresso di compensazione.

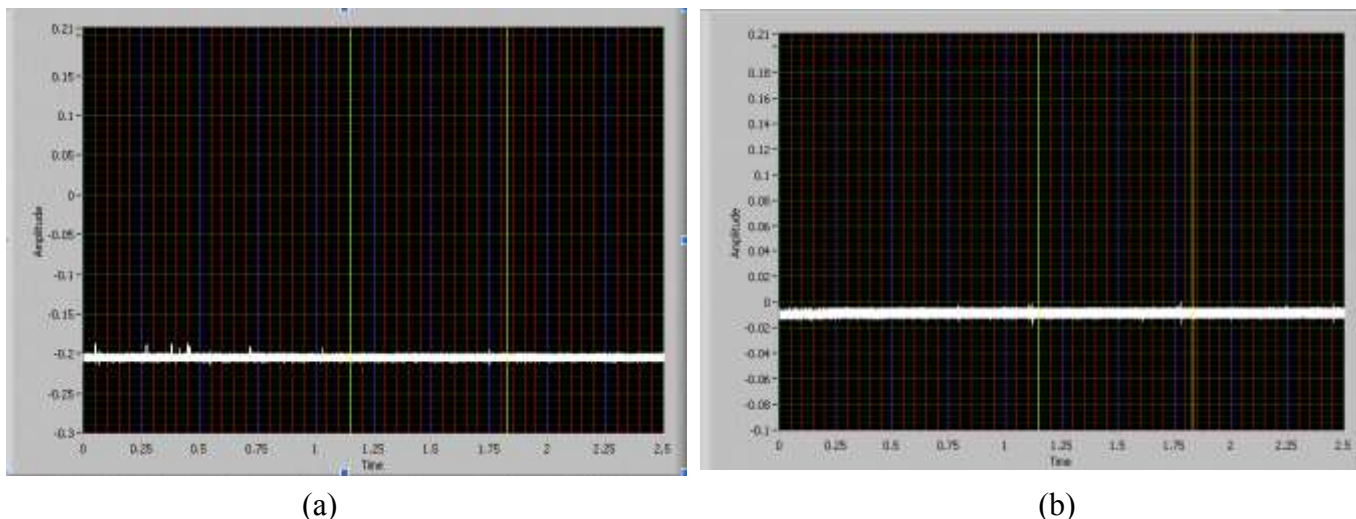


Figura 6.4: (a) segnale di rumore di fondo; (b) segnale del rumore di fondo compensato utilizzando il canale di offset.

6.2 EGSE

L'EGSE (Electrical Ground Support Equipment) è un sistema di gestione e controllo delle funzionalità dello strumento MicroMED quali acquisizione, archiviazione e analisi dei dati. L'EGSE è stato sviluppato su una piattaforma Optoplex 9020 della DELL con processore Intel® 4th generation Core™ i7. L'EGSE prevede un sistema di acquisizione dei segnali di tensione provenienti dalla scheda PE di MicroMED. Esso è dotato di un software per la memorizzazione e analisi off-line dei segnali acquisiti sviluppato in ambiente LabVIEW.

Il sistema di acquisizione è costituito da un PC con una scheda DAQ integrata PCI 6132 della National Instrument (figura 6.5). La scheda di acquisizione è gestita tramite un programma sviluppato in LabVIEW.



Figura 6.5: Scheda di acquisizione DAQ PCI 6132.

Le caratteristiche della scheda sono elencate di seguito:

- 4 input analogici a campionamento simultaneo, massimo di 2.5 MS/s o 3 MS/s in modalità warp (consulta la tab Overview).
- 4 intervalli input da ± 1.25 a ± 10 V.
- Ampia memoria su scheda (16 MS).
- 8 linee I/O digitali temporizzate per l'hardware, due contatori a 24 bit, triggering digitale e analogico. Include NI-DAQmx driver software e LabVIEW SignalExpress.
- Integrazione totale con LabVIEW, LabWindows™/CVI e Measurement Studio.

Il programma che gestisce la scheda di acquisizione è rappresentato in figura 6.6 dove sono riportati il front panel (a destra) e l'architettura del programma (a sinistra). Il front panel è costituito da un comando di start dell'acquisizione, un campo per l'inserimento del nome del file sul quale scrivere i dati e una funzione "graph" con la quale si visualizza in tempo reale il segnale acquisito. La scheda acquisisce i segnali con una frequenza di campionamento di 2.5 MHz.

In figura 6.7 sono raffigurati il front panel e l'architettura del software di analisi dati. Utilizzando il programma, oltre a visualizzare la forma d'onda, è possibile salvare la misura dell'ampiezza e la durata temporale della forma d'onda (ossia i parametri presi in considerazione per l'analisi).

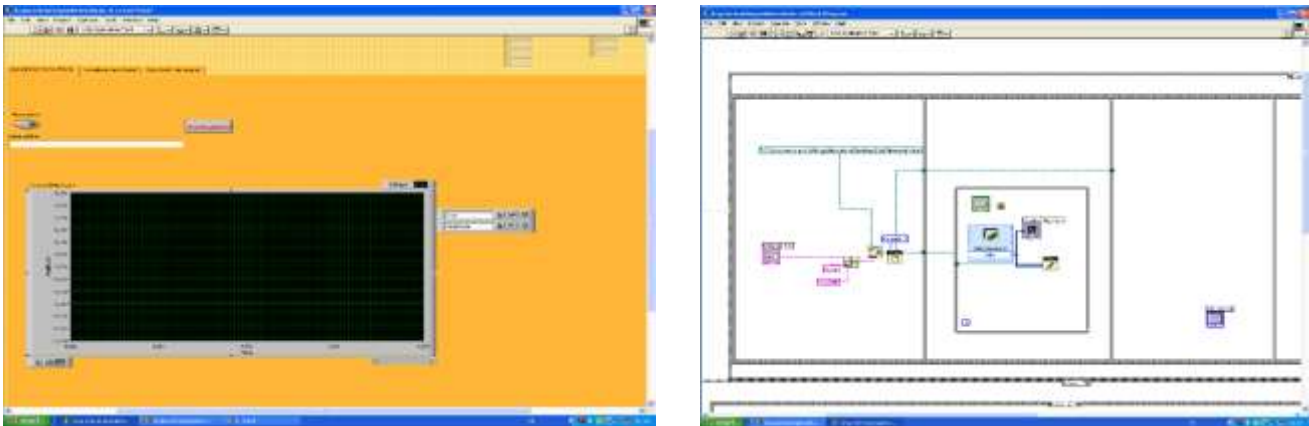
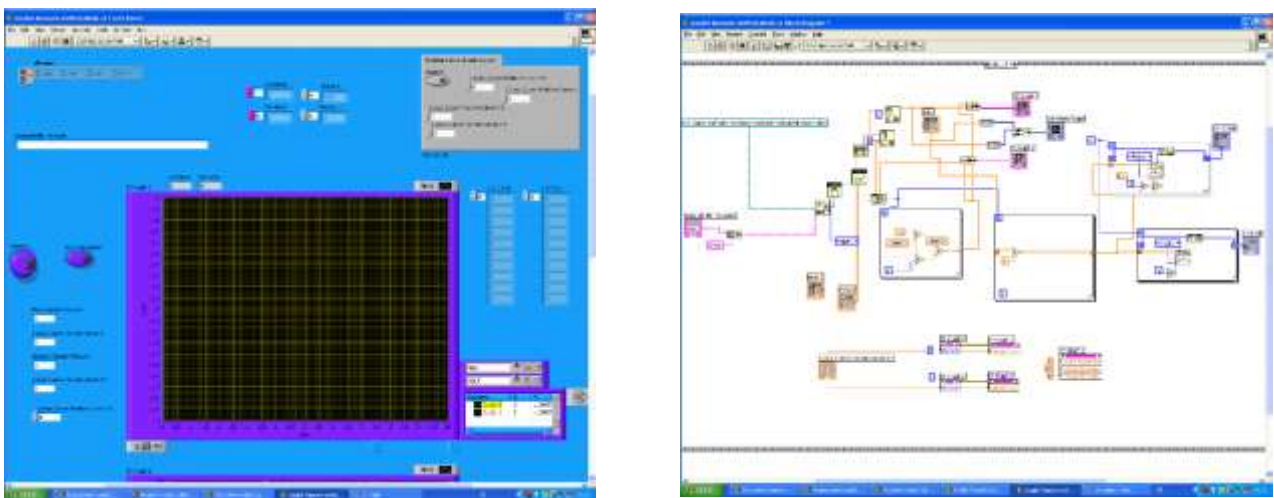


Figura 6.6: Front Panel e architettura del programma di acquisizione che gestisce la scheda DAQ PCI 6132.



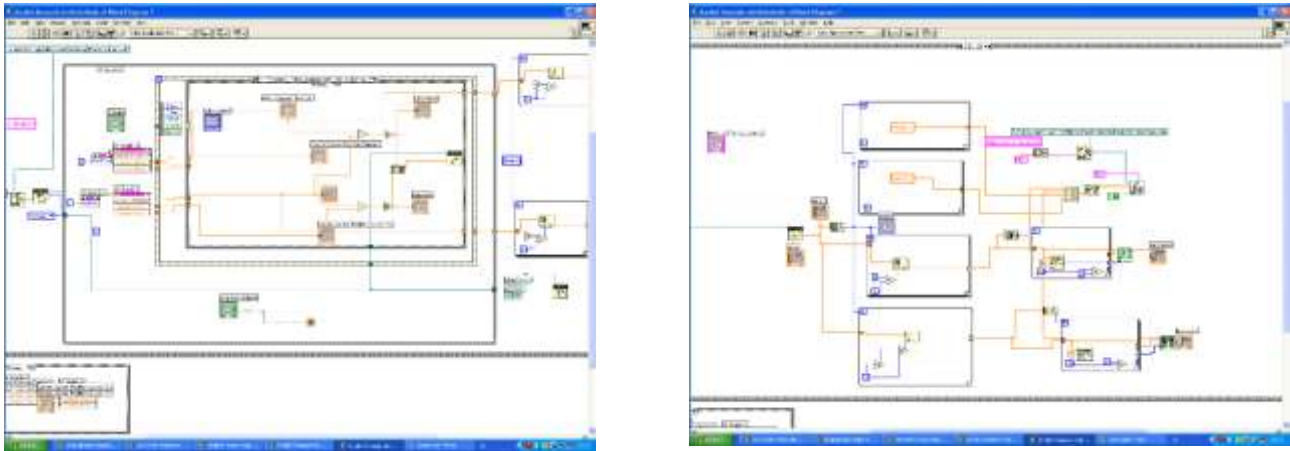


Figura 6.7: Software di analisi dati e architettura del programma.

7. Calibrazione di MicroMED

Il requisito scientifico primario di MicroMED è la misura della dimensione delle particelle nell'intervallo compreso tra $0.2 - 10 \mu\text{m}$ di raggio. Attraverso la calibrazione dello strumento si determina la relazione tra l'output di MicroMED, espresso in Volt (dato ingegneristico), e la grandezza fisica oggetto della misura, ossia la dimensione della particella rilevata dallo strumento. Nel caso di particelle sferiche ci attendiamo che l'andamento risultante dalle misure sia confrontabile con la curva della risposta strumentale teorica ricavata dalla simulazione basata sulla teoria di Mie e riportata in figura 5.7.

Per i test di calibrazione è stato utilizzato l'apparato sperimentale in figura 7.1. Esso è costituito da una camera di simulazione delle condizioni ambientali marziane, dal sistema di iniezione delle particelle, dal prototipo di MicroMED completo (figura 7.2), da diversi set di particelle sferiche calibrate e monodisperse e dal sistema di acquisizione.

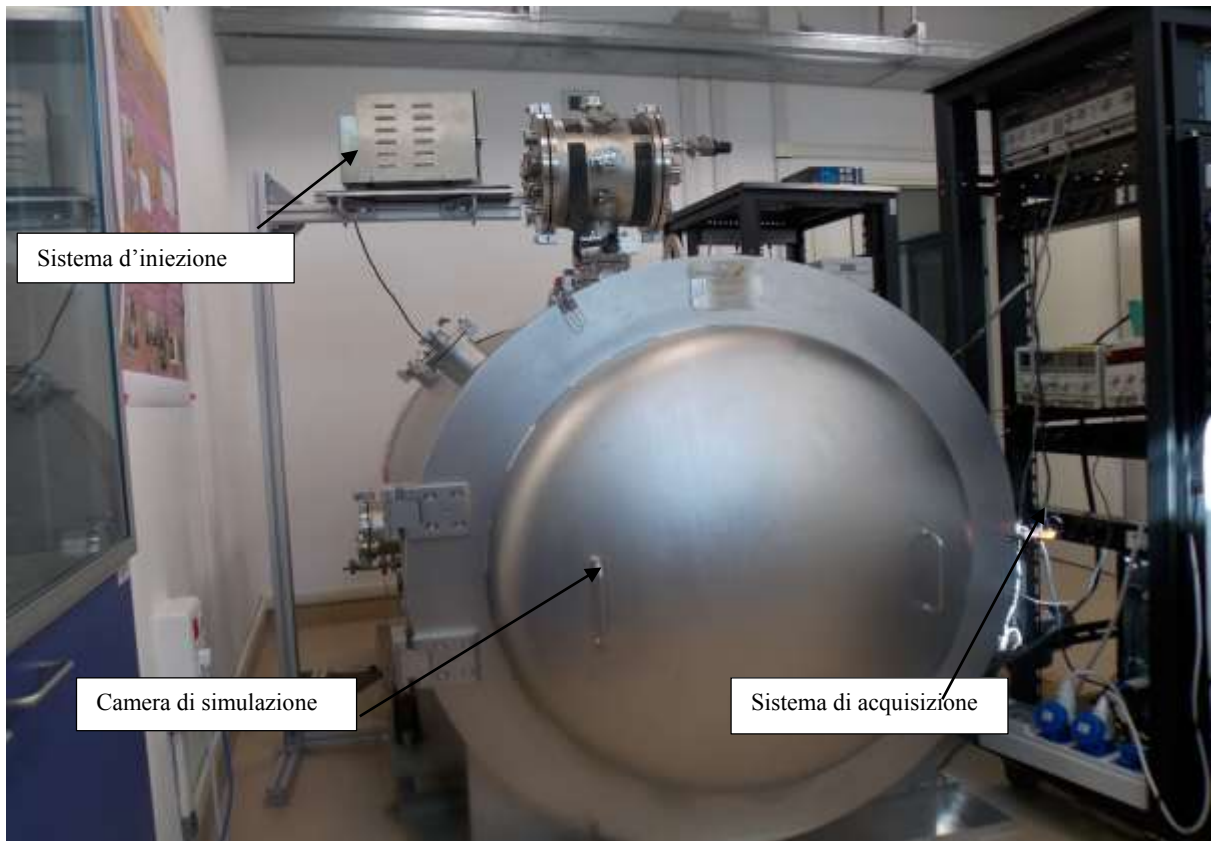


Figura 7.1: Apparato sperimentale per test di calibrazione di MicroMED.

Il prototipo di MicroMED mostrato in figura 7.2 è dotato di un coating di colore nero usato per assorbire la luce diffusa dagli elementi interni dello strumento, riducendo in tal modo la stray-light presente. Per realizzare detto coating è stata utilizzata la vernice Aeroglaze Z306, conforme alle specifiche della NASA per l'utilizzo in ambiente spaziale.

I test nella camera di simulazione sono stati eseguiti in aria, alla pressione di 6 mBar e alla temperatura di 293°K.



Figura 7.2: Prototipo MicroMED per test di calibrazione.

Le particelle monodisperse utilizzate per i test hanno il seguente diametro: 1.046, 2.043, 4.051, 6.178, 8.496 μm . Esse sono immerse in un liquido e presentano un errore sulla determinazione della dimensione di 0.04 μm . Le caratteristiche delle particelle sono riportate in tabella 7.1.

Properties	PS-Particles
Density	1,05 g/cm ³
Refractive index	1,59
Particle diameter	100 nm - 1000 μm
Monodispersity	CV<5%
Particle shape	spherical
Surface charge	anionic
Functional groups	sulfate
Hydrophilicity/Hydrophobicity	hydrophobic
Crosslinking	non-crosslinked (crosslinked)
Porosity	non-porous
Temperature stability	
Mechanical strength	robust
Solubility in acids and bases	insoluble
Stability in solvents without swelling	all water, low alcohols
Biocompatibility	biocompatible

Tabella 7.1: Caratteristiche delle particelle utilizzate per la calibrazione di MicroMED.

La procedura dei test consiste nel:

- Portare la pressione nella camera di simulazione a 6 mbar.
- Preparare una soluzione di 3 ml composta da acqua e particelle.
- Immettere la soluzione nel nebulizzatore del dispenser della Grimm che genera un flusso di particelle con una portata di 7 l/min.
- Iniettare le particelle nella precamera.
- Attivare MicroMED.
- Aprire la valvola gate che collega la precamera alla camera di simulazione.
- Avviare il sistema di acquisizione.
- Durata temporale dell'acquisizione di MicroMED: 1 minuto.

Dopo ogni misura la procedura comprende anche la ripulitura della camera, della precamera, del dispenser e di MicroMED in modo da rimuovere le particelle ivi depositate.

7.1 Analisi dei segnali acquisiti da MicroMED

L'analisi dei segnali acquisiti da MicroMED ha mostrato che il sensore è in grado di aspirare migliaia di particelle, come mostrato in figura 7.3, e di rivelarle singolarmente durante il passaggio nel volume di campionamento. Solo una piccola percentuale dei segnali è relativo al passaggio simultaneo di due o più particelle. Tali segnali vengono quindi esclusi dall'analisi. MicroMED restituisce un segnale dipendente dalla dimensione delle particelle. Infatti l'ampiezza dei segnali varia in funzione del diametro della particella come predetto dalla teoria di Mie.

In figura 7.3 è mostrato un esempio dell'acquisizione delle particelle di $4.051\ \mu\text{m}$ di diametro della durata 2.5 secondi.

Sull'asse delle ascisse è rappresentato il tempo in secondi, mentre sull'asse delle ordinate l'ampiezza dei segnali in Volt. Dall'acquisizione risulta che MicroMED è in grado di aspirare migliaia di particelle.

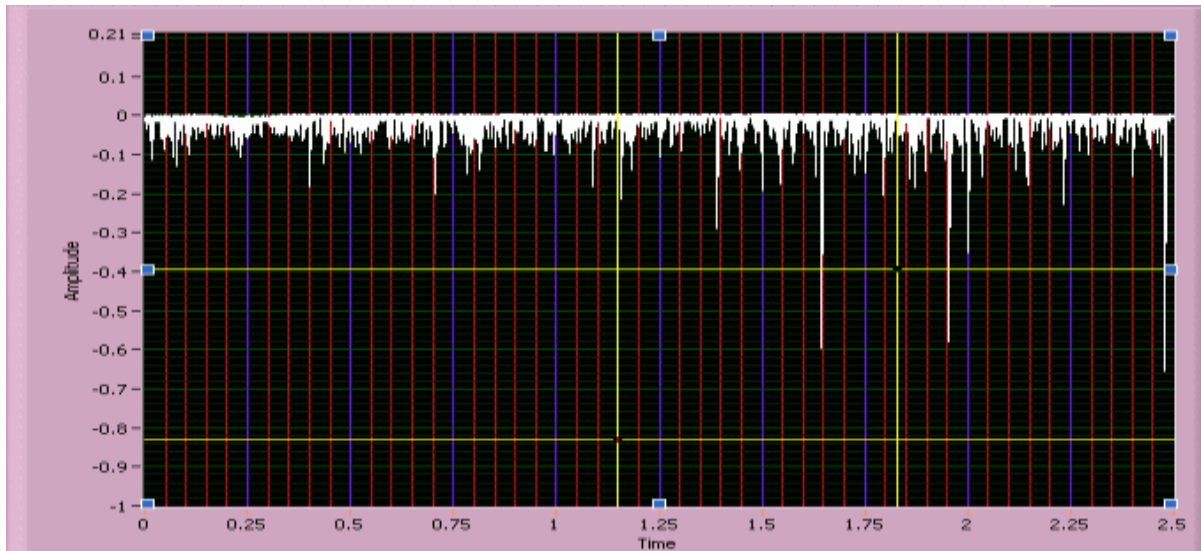
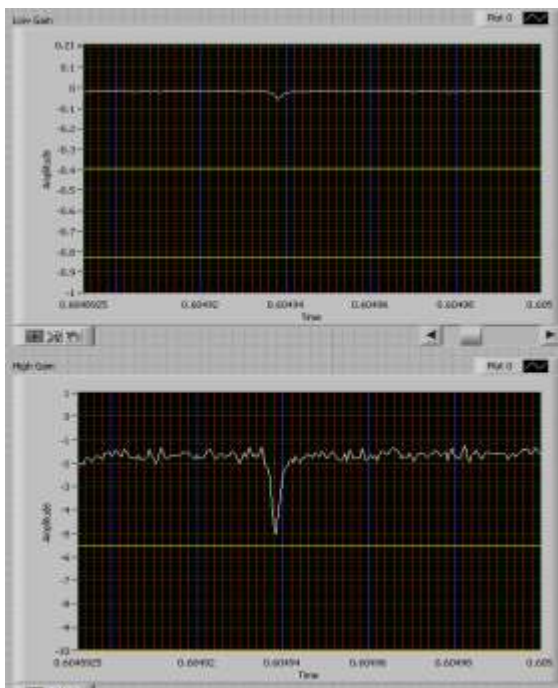
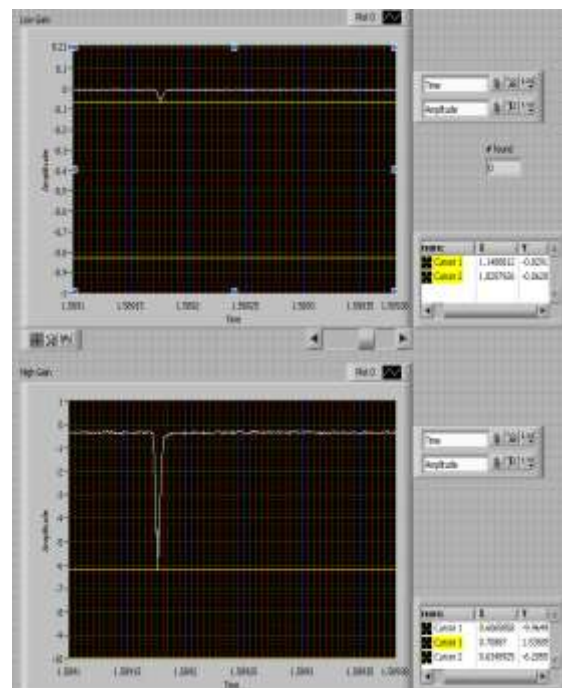


Figura 7.4: Esempio di un'acquisizione di particelle effettuata con MicroMED.

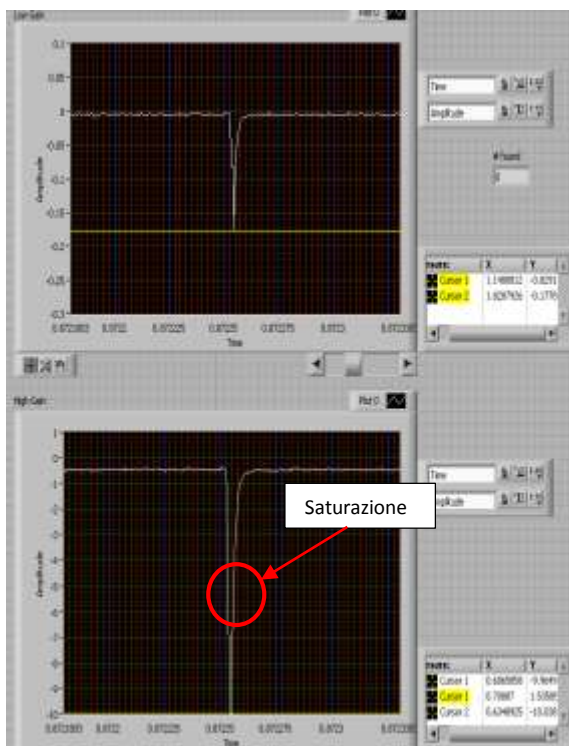
Utilizzando il software per l'analisi sviluppato in ambiente labVIEW è stato possibile analizzare i segnali singolarmente misurandone l'ampiezza, la durata temporale e la forma. In figura 7.3 sono mostrati esempi di segnali acquisiti relativi alle particelle iniettate per la calibrazione.



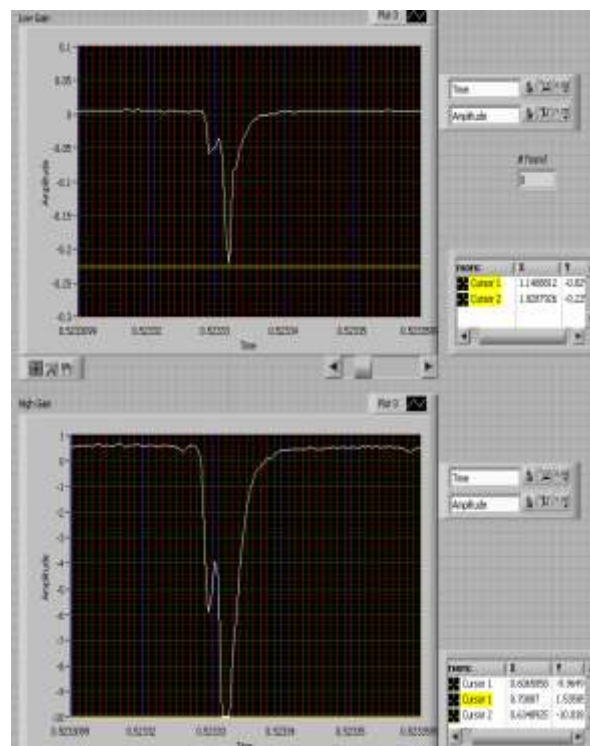
(a)



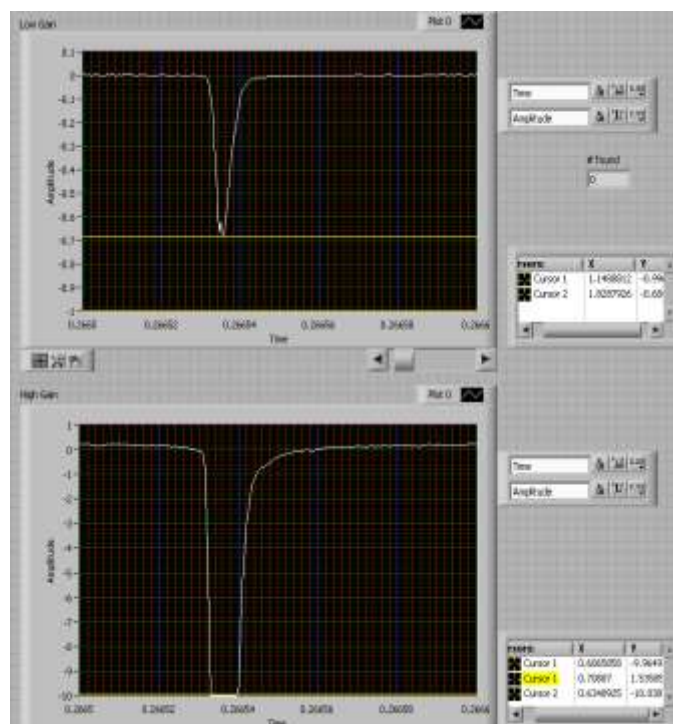
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 7.4: Segnali generati dal passaggio delle particelle nel volume di campionamento di diametri (a) 1.046 μm ; (b) 2.043 μm ; (c) 4.051 μm ; (d) 6.178 μm ; (e) 8.496 μm .

In figura 7.4 (a) è mostrato il segnale generato da una particella di 1.046 μm . Il segnale è acquisito da entrambi i canali Low-Gain (finestra superiore) e High-Gain (finestra inferiore) ma è ben visibile solo nel canale High-Gain. La particella con diametro di 1.046 μm genera un segnale dell'ordine di

qualche nA che convertito in Volt ed amplificato di un fattore 10^7 dallo stadio High-Gain presenta un ampiezza di circa 0.02 V. La durata temporale media dei segnali è all'incirca di 6.3 μ s.

Lo stesso accade per le particelle di diametro 2.043 μ m, ben visibili solo attraverso il canale High-Gain. La durata temporale media corrispondente alle particelle di 2.043 μ m è di 7.3 μ s.

Le particelle con diametro maggiore sono acquisibili solo dal canale Low-Gain con guadagno di 10^5 (mentre l'uscita del canale High-Gain non è significativa ai fini della misura, in quanto in saturazione). Le particelle con diametri di 4.051, 6.178 e 8.496 μ m generano segnali dell'ordine di 10^{-7} e 10^{-6} A, che convertiti in Volt e amplificati con fattore di 10^5 presentano ampiezze che variano tra i 0.15 – 0.6 Volt. Di conseguenza l'uscita High-Gain è in saturazione.

La forma dei segnali in figura 7.4 è gaussiana.

Come già accennato è stata misurata la forma, l'ampiezza e la durata di ogni singolo segnale per ciascuna dimensione elencata. In tabella 7.2 sono mostrati i valori medi dell'ampiezza e della durata temporale dei segnali per le particelle utilizzate durante la calibrazione.

Diametro Particella (μ m)	Valore medio Ampiezza (Volt)	Durata temporale media (μ s)
1.046	0.022 ± 0.002	6.3 ± 0.1
2.043	0.046 ± 0.006	7.3 ± 0.3
4.051	0.174 ± 0.004	8.29 ± 0.1
6.178	0.225 ± 0.005	9.2 ± 0.3
8.496	0.681 ± 0.001	10.35 ± 0.7

Tabella 7.2: Parametri relativi all'acquisizione di particelle monodisperse.

Dai dati in tabella 7.2 si evince che sia l'ampiezza che la durata temporale dei segnali sono dipendenti dal diametro della particella. Poiché l'energia non è distribuita uniformemente all'interno del volume di campionamento, si registra una dispersione nei segnali prodotti dal passaggio delle particelle, anche se con lo stesso diametro (Figura 7.3). La variazione delle ampiezze può verificarsi inoltre anche nel caso di un passaggio simultaneo di due o più particelle.

La distribuzione non uniforme della luce nel volume di campionamento è una delle cause della variazione dell'ampiezza dei segnali generati da particelle con uguale dimensione. In figura 7.5 è mostrato il profilo del volume di campionamento e tre ipotetiche particelle indicate con P1, P2 e P3 di uguale dimensione, ma che attraversano il volume in punti in cui la distribuzione dell'intensità della luce non è omogenea. Di conseguenza P1, P2 e P3 generano tre segnali di differente ampiezza. L'ampiezza del segnale varia in funzione della posizione della particella nel volume di campionamento. Quindi considerare il valore medio delle ampiezza equivale a considerare un segnale generato da una particella che attraversa una distribuzione media di energia nel volume di campionamento.

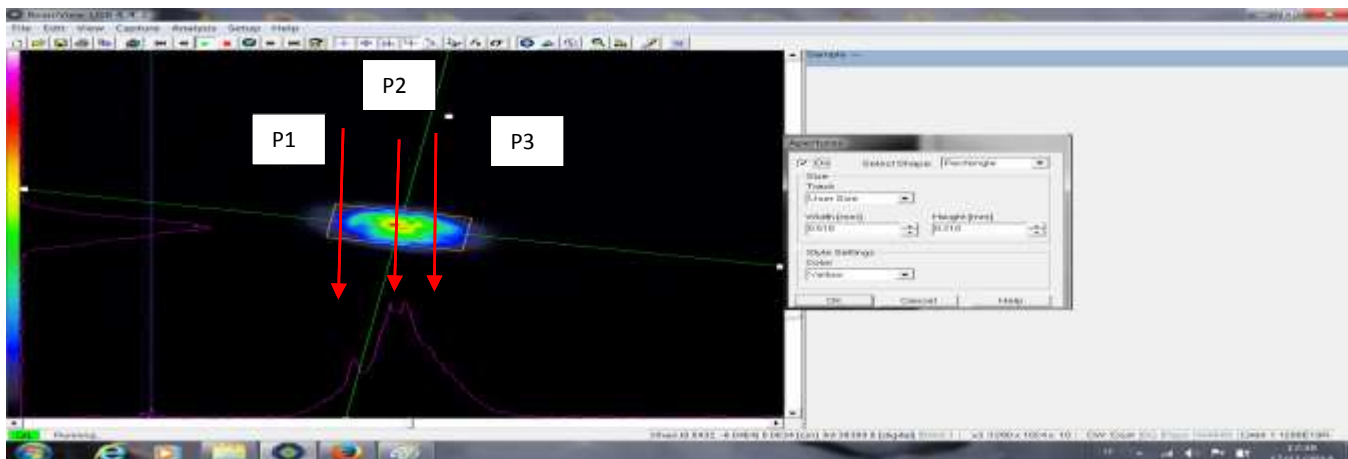


Figura 7.5: Schema del passaggio delle particelle di diametro 4.052 μm attraverso il volume di campionamento.

I segnali generati dal passaggio simultaneo di due o più particelle presentano sia un'ampiezza maggiore che una durata temporale maggiore. Un esempio di segnale prodotto da una coincidenza è mostrato in figura 7.5. Il segnale presenta dei picchi multipli ciascuno corrispondente al passaggio di una particella. La durata temporale dei suddetti segnali varia tra i 20-50 μs .

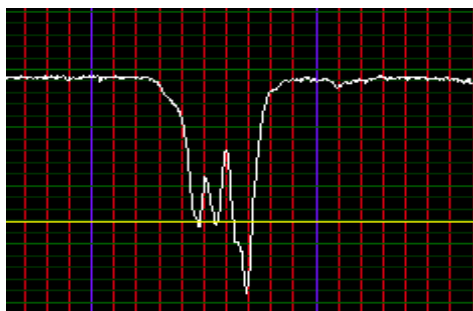
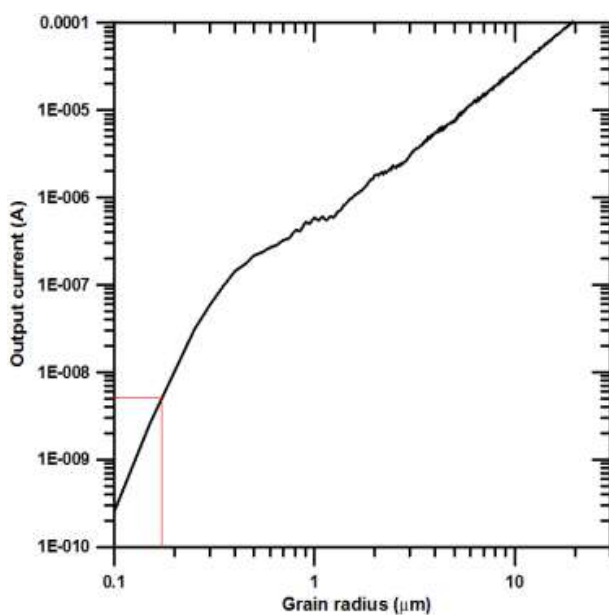
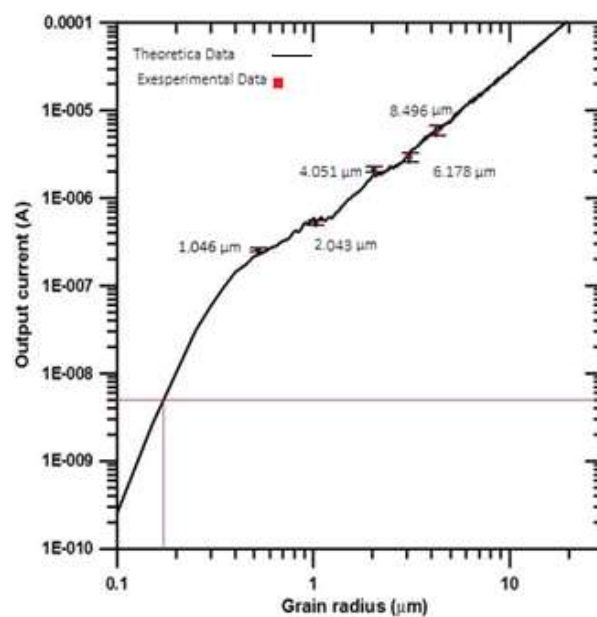


Figura 7.5: Segnale generato dal passaggio simultaneo di tre particelle.

I dati riportati in tabella 7.2 sono stati confrontati con la curva rappresentante la risposta strumentale teorica di MicroMED. In figura 7.6 (a) è rappresentata la curva teorica che esprime la corrispondenza tra il segnale teorico che una particella produce nell'attraversare il volume di campionamento di MicroMED e la dimensione della particella stessa. In figura 7.6 (b) è mostrata la medesima curva sulla quale sono sovrapposti i valori medi delle ampiezze dei segnali reali acquisiti da MicroMED.



(a)



(b)

Figura 7.6: (a) curva teorica esprimente la corrispondenza tra il segnale teorico generato nell'interazione particella-volume di campionamento e raggio della particella; (b) sovrapposizione tra dati reali acquisiti con MicroMED e curva teorica.

L'accordo tra i dati teorici e sperimentali è ottimo.

Il funzionamento del sensore di particelle **MicroMED**, sviluppato dal gruppo di ricerca di planetologia dell'INAF-Osservatorio Astronomico di Capodimonte, è quindi pienamente rispondente ai requisiti di progetto. Lo strumento è in grado di misurare correttamente la dimensione delle particelle aspirate. I test sperimentali hanno validato tutti i risultati delle simulazioni teoriche alla base del disegno dello strumento.

Conclusioni

Lo sviluppo dello strumento MicroMED ha previsto la progettazione, la realizzazione e i test di un optical particle counter di dimensioni 40 x 36 x 43 mm con basso consumo (1 W) e massa ridotta (500 g), capace di misurare la distribuzione dimensionale e la densità numerica delle polveri in sospensione nell'atmosfera marziana, in vicinanza della superficie e con un intervallo di misura compreso tra 0.2 e 10 μm di raggio.

MicroMED è stato progettato per aspirare le particelle situate in sospensione nell'atmosfera di Marte, indirizzarle verso una piccola regione (volume di campionamento) posta all'interno dello strumento e illuminata da un sistema ottico, e determinarne le dimensioni.

Sono stati realizzati due prototipi dello strumento. Il primo modello è costituito dalla sola scatola dello strumento, di cui sono state riprodotte fedelmente le dimensioni interne come da disegno, oltre ai condotti di aspirazione (inlet) e di scarico (outlet) e alla pompa. E' stato utilizzato per caratterizzare gli aspetti fluidodinamici del sensore. Il secondo prototipo contiene anche il sistema ottico e l'elettronica di prossimità ed è stato utilizzato per i test funzionali e di calibrazione.

Sono stati eseguiti diversi test atti a dimostrare la funzionalità e le prestazioni dell'esperimento. I test che hanno riguardato gli aspetti fluidodinamici di MicroMED hanno avuto lo scopo di verificare il sistema di aspirazione, il regime del flusso (turbolento o laminare) e studiare il moto delle particelle nel flusso. I risultati hanno indicato che MicroMED è capace di aspirare particelle nell'intervallo dimensionale richiesto (0.4-20 μm), che il regime del flusso è laminare e che le particelle subiscono una deviazione rispetto alla linea centrale del flusso aspirato dipendente dalla loro dimensione. Tali deviazioni sono comunque minori della dimensione del volume di campionamento per cui tutte le particelle in transito all'interno dello strumento possono essere rilevate. I test hanno confermato i risultati delle simulazioni effettuate in ambiente Fluent.

La scheda dell'elettronica di prossimità è stata testata per verificare che la banda passante fosse adeguata alla rilevazione del passaggio di grani aspirati dallo strumento. La differente velocità posseduta dalle particelle incide infatti sui tempi di attraversamento del volume di campionamento e quindi sulla durata del segnale in uscita dal fotodiodo, che viene processato dall'elettronica di prossimità. I risultati dei test dimostrano che il segnale amplificato da entrambi i canali della PE non subisce distorsioni al variare del tempo di attraversamento delle particelle. La PE è quindi adeguata a processare i segnali generati dal rivelatore dello strumento.

Le misure eseguite sul sistema ottico hanno permesso di caratterizzare il volume di campionamento dello strumento, ovvero di misurarne la forma, la dimensione e la potenza ottica. Il volume di campionamento ha forma ellittica, l'asse maggiore misura 518 μm e l'asse minore 210 μm , la potenza ottica è di 74.5 mW. Utilizzando i risultati della caratterizzazione è stata ricavata la densità di energia. Tale valore è stato utilizzato come parametro in una simulazione basata sulla teoria di Mie, il cui risultato rappresenta la risposta teorica strumentale di MicroMED.

I test funzionali e di calibrazione eseguiti sul secondo prototipo hanno avuto l'obiettivo di studiare la risposta dello strumento al passaggio delle particelle all'interno del volume di campionamento al variare della loro dimensione. Per questi test sono state utilizzate particelle sferiche calibrate con dimensione di: 1.046, 2.043, 4.051, 6.178, 8.496 μm di diametro. I segnali in uscita dallo strumento (in Volt) al variare delle dimensioni dei grani rilevati sono stati confrontati con la risposta strumentale teorica ottenuta a partire dalla teoria di diffusione di Mie. L'accordo tra i dati teorici e sperimentali è ottimo e dimostra la piena funzionalità e rispetto dei requisiti scientifici dello strumento.

I test sono stati eseguiti in una camera di simulazione marziana in cui è stato disegnato, installato e testato un sistema di iniezione di particelle.

Le operazioni di MicroMED sono state gestite attraverso un sistema di acquisizione, controllo, archiviazione ed elaborazione dei dati (EGSE), realizzato specificatamente per questo strumento.

Nel corso del lavoro di dottorato è stato quindi sviluppato, realizzato e testato un sensore capace di misurare la distribuzione dimensionale delle polveri. Il livello tecnologico (TRL) raggiunto, in base alla definizione della NASA, è superiore a 4: è stato realizzato un *Elegant Breadboard*, validato e testato in laboratorio. Parte dei test sono stati realizzati in condizioni marziane (*relevant environment*).

MicroMED è stato proposto per essere inserito nel pacchetto di strumenti che verranno alloggiati sulla piattaforma di discesa della missione ExoMars 2018 all'interno di una suite di sensori, denominato *Dust Suite*, dedicato allo studio dei meccanismi di sollevamento della polvere su Marte e degli effetti da questi prodotti sul campo elettrico atmosferico.

Bibliografia

- Anderson, E.M., Leovy, C.B., *Mariner 9 Television Limb Observations of Dust and Ice Hazes on Mars* -Journal of Atmospheric Science, Vol. 35, pp. 723-734, 1978.
- Bagnold, R.A., *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes* - London: Methuen, 1941.
- Balme, M., Hagermann, A., *Particle Lifting at the Soil–Air Interface by Atmospheric Pressure Excursions in Dust Devils* - Geophysical Research Letters, Vol. 33, 2006.
- Biener, K.K., et al., *Observations of Dust Devils in MOC Wide Angle Camera Images* - Lunar Planetary Science XXXIII, Abstract N. 2004, 2002.
- Bjoraker, G.L., Mumma, M.J., Larson, H.P., *Isotropic Abundance Ratios for Hydrogen in the Martian Atmosphere* - Bulletin of American Astronomy Society, Vol. 21, pp. 991, 1989.
- Bohren, C.F., Huffman, D.R., *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*, John Wiley, New York, 1998.
- Bourke M C, Edgett K S and Cantor B A 2008 Recent aeolian dune change on Mars *Geomorphology* 94 247–5
- Bridges N T et al 2012a Planet-wide sand motion on Mars *Geology* 40 31–4
- Bridges N T, Ayoub F, Avouac J P, Leprince S, Lucas A and Mattson S 2012b Earth-like sand fluxes on Mars *Nature* 485 339–42
- Cantor B A, Kanak K K and Edgett K S 2006 Mars Orbiter Camera observations of Martian dust devils and their tracks (September 1997 to January 2006) and evaluation of theoretical vortex models *J. Geophys. Res.* 111 E12002
- Chojnacki M, Burr D M, Moersch J E and Michaels T I 2011 Orbital observations of contemporary dune activity in Endeavor crater, Meridiani Planum, Mars *J. Geophys. Res.* 116 E00F19
- R. T. Clancy¹, M. J. Wolff, P. R. Christensen 2003; *Journal of Geophysical Research: Planets* Volume 108, Issue E9.
- P. R. Christensen, J. L. Bandfield, V. E. Hamilton, et al Mars Global Surveyor Thermal Emission Spectrometer experiment: Investigation description and surface science results *Journal of Geophysical Research*, Vol. 106, no. E10, pp 23,823–23,871, October 25, 2001
- Colangeli, L., et. al., *MEDUSA: The ExoMars Experiment for in-situ Monitoring of Dust and Water Vapour* - Planetary and Space Science, Vol. 57, Issue 8-9, pp. 1043-1049, 2009.
- Colangeli, L., *GIADA: The Grain Impact Analyzer and Dust Accumulator for the Rosetta Space Mission* – Advances in Space Research, Vol. 39, pp. 446-450, 2007.
- Colangeli, L., Mazzotta Epifani, E., Palumbo, P., *The New Rosetta Targets – Observations, Simulations, and Instrument Performances* – Kluwer Academic Publishers, 2004.
- Colburn, D., et al., *Diurnal Variations in Optical Depth at Mars* - Icarus, Vol. 79, pp. 159-189, 1989.

- Drossart, P., et al., *Martian Aerosol Properties from the Phobos/ISM Experiment* - Annales Geophysicae, Vol. 9, pp. 754-760, 1991.
- Fenton L K, Toigo A D and Richardson M I 2005 Aeolian processes in Proctor crater on Mars: mesoscale modeling of dune-forming winds J. Geophys. Res.110 E06005
- Fenton L K 2006 Dune migration and slip face advancement in the Rabe crater dune field, Mars Geophys. Res. Lett. 33 L20201
- Fenton L K and Michaels T I 2010 Characterizing the sensitivity of daytime turbulent activity on Mars with the MRAMS LES: early results Mars 5 159–171
- Ferri, F., et al., *Dust Devils as Observed by Mars Pathfinder* - Journal of Geophysical Research, Vol. 108, N. E12, pp. 5133, 2003.
- Forget, F., Costard, F., Lagnonné, F., *Planet Mars* - Story of Another World - Springer, 2006
- Formisano, V., et al., *Detection of Methane in the Atmosphere of Mars* - Science, Vol. 306, pp. 1758-1747, 2004.
- Formisano, V., et al., *IRIS Mariner 9 Data Revisited: Water and Dust Daily Cycles* - Planetary Space Science, Vol. 49, pp. 1331-1346, 2001.
- Geissler P E, Sullivan R, Golombek M, Johnson J R, Herkenhoff K, Bridges N, Vaughan A, Maki J, Parker T and Bell J 2010 Gone with the wind: Eolian erasure of the Mars Rover tracks J. Geophys. Res. 115 E00f11
- Greeley R, Balme M R, Iversen J D, Metzger S, Mickelson R, Phoreman J and White B 2003 Martian dust devils: laboratory simulations of particle threshold J. Geophys. Res. 108 5041
- Greeley R et al 2006 Gusev crater: wind related features and processes observed by the Mars Exploration Rover Spirit J. Geophys. Res.111 E02S09
- Griffin, D.W., **C.A. Kellogg** and E.A. Shinn, 2001. Dust in the wind: Long range transport of dust in the atmosphere and its implications for global public and ecosystem health. *Global Change & Human Health* 2: 2-15
- Hand, E. 21 october 2008. Plumes of methane identified onMars. Nature 455, 1018 (2008) | doi:10.1038/4551018a
- Haberle R M, Murphy J R and Schaeffer J 2003 Orbital change experiments with a Mars general circulation model Icarus 161 66–89
- Hamilton V E, Mc Sween H Y and Hapke B 2005 Mineralogy of Martian atmospheric dust inferred from thermal infrared spectra of aerosols J. Geophys. Res.110 E12006
- Hansen C J et al 2011 Seasonal erosion and restoration of Mars's northern polar dunes Science 331 575–8
- Holstein-Rathlou C et al 2010 Winds at the Phoenix landing site J. Geophys. Res. 115 E00E1

Horne, D., Smith, M.D., *Mars Global Surveyor Thermal Emission Spectrometer (TES) Observations of Variations in Atmospheric Dust Optical Depth over Cold Surfaces* - Icarus, Vol. 200, pp. 118-128, 2009.

Iversen, J.D., Greeley, R., Pollack, J.B., *Windblown Dust on Earth, Mars and Venus* - *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 33, N. 12, pp. 2425-2429, 1976

Iversen, J.D., White, B.R., *Saltation Threshold on Earth, Mars and Venus* - *Sedimentology*, Vol. 29, pp.111-119, 1982.

Jakosky, B.M., Martin, T.Z. Mars: North-polar atmospheric warning during dust storms
Icarus Volume 72, Issue 3, December 1987, Pages 528–534

Jakosky, B.M., Haberle, R.M., *The Seasonal Behaviour of Water on Mars* - The University of Arizona Press, pp. 969-1016, 1992.

James, P.B., et al., *Monitoring Mars with the Hubble Space Telescope: 1990-1991 Observations* - Icarus, Vol. 109, pp. 79-101, 1994.

Jaquin F., Gierasch P., Kahn R., *The vertical structure of limb hazes in the Martian atmosphere*
Icarus Volume 68, Issue 3 December 1986, Pages 442–461

Jones, K.L., et al., *One Mars year: Viking Lander Imaging* - Science, Vol. 204, pp. 799-806, 1979.

Kahn, R.A., et al., *The Martian Dust Cycle* - The University of Arizona Press, pp. 1017-1053, 1992.

Kahn, R.A., *Ice Haze, Snow, and the Mars Water Cycle* - Journal of Geophysical Research, Vol. 95, pp. 14677-14693, 1990.

Kahn, R.A., et al., *The Martian Dust Cycle* - The University of Arizona Press, pp. 1017-1053, 1992.

Kahn, R.A., *Ice Haze, Snow, and the Mars Water Cycle* - Journal of Geophysical Research, Vol. 95, pp. 14677-14693, 1990.

Kieffer, H.H., *Mars South Polar Spring and Summer Temperatures - A Residual CO₂ Frost* - Journal of Geophysical Research, Vol. 84, pp. 8263-8288, 1979.

Kok J F 2010a An improved parameterization of wind-blown sandflux on Mars that includes the effect of hysteresis Geophys. Res. Lett.37 L12202

Kok J F 2010b Difference in the wind speeds required for initiation versus continuation of sand transport on Mars: implications for dunes and dust storms Phys. Rev. Lett. 104 074502

Kok J 2012 Planetary Science: Martian sand blowing in the wind Nature 485312–3

Leovy, C., et al., *The Martian Atmosphere: Mariner 9 Television Experiment Progress Report* - Icarus, Vol. 17, pp. 373-393, 1972.

- Martin, T.Z., Richardson, M.I., *New Dust Opacity Mapping from Infrared Thermal Mapper Data* - Journal of Geophysical Research, Vol. 98, pp. 10941-10949, 1993.
- Martin, T.Z., *Thermal Infrared Opacity of the Mars Atmosphere* - Icarus, Vol. 66, pp. 2-21, 1986.
- Mumma, M.J., et al., *A Sensitive Search for Methane on Mars* – American Astronomical Society, DPS Meeting, Vol. 35, pp. 14-18, 2003.
- Mumma, M.J., et al., *Strong Release of Methane on Mars in Northern Summer 2003* - Science, Vol. 323, pp. 1041-1045, 2009.
- Muyshondt, A, Mc Farland, A.R., Anand, N.K., *Turbulent Deposition of Aerosol Particles in Large Transport Tubes* – Aerosol Science Technology, Vol. 24, pp. 107-116, 1996.
- NASA, *Mars FactDataSheet*, Nov. 2007 <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/marsfact.html>.
- Neakrase LDV and Greeley R 2010b Dust devils in the laboratory: effect of surface roughness on vortex dynamics J. Geophys. Res. 115 E05003
- Pollack, J.B., et al., *Properties and Effects of Dust Particles Suspended in the Martian Atmosphere* - Journal of Geophysical Research, Vol. 84, pp. 2929-2945, 1979.
- Pollack, J.B., et al., *Properties of Aerosols in the Martian Atmospheres as Inferred from Viking Lander Imaging Data* - Journal of Geophysical Research, Vol. 82, pp. 4479-4496, 1977.
- Pollack, J.B., Ockert, M.E., Shepard, M.K., *Viking Lander Image Analysis of Martian Atmospheric Dust* - Journal of Geophysical Research, Vol. 100, pp. 5235-5250, 1995.
- Renno, N.O. et al., *Electrical discharges and broadband radio emission by Martian dust devils and duststorms* - Geophysical Research Letters, Vol. 30, pp. 2140, 2003.
- Renno, N.O. et al., *MATADOR 2002: A pilot field experiment on convective plumes and dust devils* - Journal of Geophysical Research, Vol. 109, E07001, 2004.
- Renno, N.O., Kok, J.F., *Electrical Activity and Dust Lifting on Earth, Mars, and Beyond* - Space Science Reviews, Vol. 137, Issue 1-4, pp. 419-434, 2008.
- Ringrose, T.J., Towner, M.C., Zarnecki, J.C., *Convective Vortices on Mars: A Reanalysis of Viking Lander 2 Meteorological Data, Sols 1-60* - Icarus, Vol. 163, pp. 78-87, 2003.
- Ryan, J.A., Henry, R.M., *Mars Atmospheric Phenomena during Major Dust Storms as Measured at the Surface* - Journal of Geophysical Research, Vol. 84, pp. 2821-2829, 1979.
- Ryan, J.A., Lucich, R.D., *Possible Dust Devils, Vortices on Mars* - Journal of Geophysical Research, Vol. 88, N. C15, pp. 11005-11011, 1983.
- Shao, Y., Raupach, M.R., Leys, J.F., *A Model for Predicting Aeolian Sand Drift and Dust Entrainment on Scales from Paddock to Region* - Australian Journal of Soil Research. Vol. 34, pp. 309-342, 1996.

- Shao Y. P. and Lu H. 2000 A simple expression for wind erosion threshold friction velocity J. Geophys. Res. 105 22437–43
- Shelton, H., Hendricks, C.D., Wuerker, R.F., *Electrostatic Acceleration of Microparticles to Hypervelocities* - Journal of Applied Physics, Vol. 31, p. 1243, 1960.
- Silvestro S, Fenton L K, Vaz D A, Bridges N T and Ori G G 2010 Ripple migration and dune activity on Mars: Evidence for dynamic wind processes Geophys. Res. Lett. 37 L20203
- Silvestro S, Vaz D A, Fenton L K and Geissler P E 2011 Active aeolian processes on Mars: a regional study in Arabia and Meridiani Terrae Geophys. Res. Lett. 38 L20201
- Sinclair, P.C., *General Characteristics of Dust Devils* - Journal of Applied Meteorology, Vol. 8, pp. 32-45, 1969.
- Sleep, N.H., *Martian Plate Tectonics* - Journal of Geophysical Research, Vol. 99, pp. 5,639-5,655, 1994
- Smith, D.E., et al., *Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA): Experiment Summary after the First Year of Global Mapping of Mars* - Journal of Geophysical Research, Vol. 106, pp. 23,689-23,722, 2001.
- Sorensen, C.M., Wang, G.M., *Note on the Correction for Diffusion and Drag in the Slip Regime* – Aerosol Science and Technology, Vol. 33, pp. 353-356, 2000.
- Stanzel, C., et al., *Dust Devil Speeds, Directions of Motion and General Characteristics Observed by the Mars Express High Resolution Stereo Camera* - Icarus, Vol. 197, pp. 39–51, 2008.
- Sullivan, R. et al., *Results of the Imager for Mars Pathfinder Windssock Experiment* – Journal of Geophysical Research, Vol. 105, N. E10, pp. 24547-24562, 2000.
- Sullivan, R., et al., *Wind-driven Particle Mobility on Mars: Insights from Mars Exploration Rover Observations at the "El Dorado" and Surroundings at Gusan Crater* - Journal of Geophysical Research, Vol. 113, N. E06S07, 2008.
- Thomas, P. and Gierasch, P. J. 1985 Dust devils on Mars Science 230 175–7
- Tomasko, M.G., et al., *Properties of Dust in the Martian Atmosphere from the Imager on Mars Pathfinder*- Journal of Geophysical Research, Vol. 194, pp. 8987-9007, 1999.
- Toon, O.B., Pollack, J.B., Sagan, C., *Physical Properties of the Particles Composing the Martian Dust Storm of 1971-1972* - Icarus, Vol. 30, pp. 663-696, 1977.
- Ventura, S. The MEDUSA and MicroMED experiments for the ExoMars space programme to perform in situ analysis of martian dust PhD Thesis 2011.
- Waldman, L. Schmitt, K.H., *Thermophoresis and diffusiophoresis of Aerosols* – Aerosol Science, C.N.Davies, New York, Academic Press, pp. 137-162, 1966.

White, B.R., *Soil transport by winds on Mars* – Journal of Geophysical. Research, Vol. 84, pp. 4643-4651, 1979.

White, F.M., *Viscous Fluid Flow* - McGraw-Hill, Inc., 1991.

Wilhelms, D.E., Squyres, S.W., *The Martian Hemispheric Dichotomy May Be Due to a Giant Impact* -Nature, Vol. 309, pp. 138-140, 1984.

Wilson, A. M., *The occurrence and chemical implications of geothermal convection of seawater in continental shelves* - Geophysical Research Letters, Vol. 30, pp. 2127, 2003.

Wise, D.U., Golombek, M.P., McGill, G.E., *Tectonic Evolution of Mars* - Journal of Geophysical Research, Vol. 84, pp. 7934-7939, 1979.

Wise, D.U., Golombek, M.P., McGill, G.E., *Tharsis Province of Mars - Geologic Sequence, Geometry, and a Deformation Mechanism* - Icarus, Vol. 38, pp. 456-472, 1979.

Wolff, M.J., Clancy, R.T., *Constraints on the Size of Martian Aerosols from Thermal Emission Spectrometer Observations* - Journal of Geophysical Research, Vol. 108, N. E9, pp. 5097, 2003.

Wolff, M.J., et al., *1995 Observations of Martian Dust Storms Using the Hubble Space Telescope* - Journal of Geophysical Research, Vol. 102, pp. 1679-1691, 1977.

Wolff, M.J., et al., *Constraints on Dust Aerosols from the Mars Exploration Rovers using MGS Overflights and Mini-TES* - Journal of Geophysical Research, Vol. 111, N. E12S17, 2006.

Wurm G, Teiser J and Reiss D 2008 Greenhouse and thermophoretic effects in dust layers: the missing link for lifting of dust on Mars Geophys. Res. Lett. 35 L10201

Zureck, R.W. et al., *Dynamics of the Atmosphere of Mars* - The University of Arizona Press, pp. 835-933, 1992.

Zureck, R.W., *Diurnal Tide in the Martian Atmosphere* - Journal of Atmospheric Science, Vol. 33, pp. 321-337, 1992.

Zureck, R.W., et al., *Comparative Aspects of the Climate of Mars: An Introduction to the Current Atmosphere* - The University of Arizona Press, pp. 835-933, 1992.

